

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени В. Н. КАРАЗИНА

## **ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРОВ**

Методические указания к лабораторным работам

Харьков – 2009

УДК 621.373.826 (075.8)  
ББК 32.86-5я73  
И 37

*Утверждено на заседании Ученого Совета радиофизического  
факультета Харьковского национального университета  
имени В. Н. Каразина (протокол № 4 от 17.04.2009 г.)*

**Рецензенты:**

доктор физ.-мат.наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники Украины, профессор Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина **Дюбко С. Ф.**;  
доктор физ.-мат.наук, профессор, зав.отделом квантовой электроники и нелинейной оптики Института радиофизики и электроники им. О. Я. Усикова НАН Украины **Дзюбенко М. И.**

**И 37 Измерение характеристик лазеров:** Методические указания к лабораторным работам/ составители: Свич В. А., Маслов В. А., Дегтярев А. В.  
– Х: ХНУ имени В. Н. Каразина. – 2009. – 71 с.

Описаны физические принципы квантовых генераторов и методы измерений их характеристик, методика и порядок выполнения лабораторных работ, а также даны контрольные вопросы для самопроверки усвоенного материала.

Для студентов радиофизического факультета ХНУ.

УДК 621.373.826 (075.8)  
ББК 32.86-5я73

© Харьковский национальный  
университет имени В. Н. Каразина, 2009  
© Свич В. А., Маслов В. А., Дегтярев А. В., 2009  
© Макет обложки Дончик И. Н., 2009

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Настоящие методические указания предназначены для студентов радио-физического факультета, проходящих лабораторный практикум по курсу "Измерение характеристик лазеров".

Основная цель практикума – приобретение студентами навыков определения основных параметров и характеристик лазеров, накопления опыта работы с измерительными приборами и обработки результатов эксперимента.

Перед началом работы студентам необходимо хорошо уяснить себе цель работы, изучить описание, ознакомиться с рекомендованной литературой. Необходимо также хорошо познакомиться с измерительной аппаратурой, используемой в работе.

Затем каждый студент сдает допуск к выполнению работы преподавателю. Во время допуска студент обязан показать, что он твердо уяснил себе цель работы, знает теорию вопроса, умеет обосновать метод измерений, может начертить блок-схему, умеет обращаться с измерительными приборами.

После сдачи допуска студент приступает к выполнению работы.

По окончании работы результаты представляются преподавателю для проверки и отметки о выполнении работы. На следующем занятии студент сдает допуск по новой работе и письменный отчет по предыдущей работе. В отчете основное внимание обращается на представление и объяснение полученных экспериментальных результатов. Студенты, не сдавшие отчеты по предыдущей работе, к следующей работе не допускаются.

Отчет должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Блок-схемы измерений.
3. Результаты измерений и вычислений в виде таблиц и графиков.
4. Краткий анализ полученных результатов и выводы.
5. Список измерительных приборов, используемых в работе, с указанием их типа, пределов измерений и точности.

Все схемы, таблицы и графики в отчете должны быть выполнены аккуратно с соблюдением принятых обозначений.

Общие требования техники безопасности. На всех лабораторных работах используются источники напряжения, величина которого может быть опасна для жизни. Кроме того, лазерное излучение (прямое, отраженное, рассеянное) при попадании в органы зрения или на кожу может вызвать их повреждение. Студенты, не изучившие инструкции по технике безопасности в данной лаборатории, к работе не допускаются.

Работа на каждой установке производится не менее чем двумя студентами только в присутствии преподавателя или лаборанта. Категорически запрещается нахождение вблизи работающей установки посторонних или случайных лиц.

Действующие на данном практикуме установки обеспечивают безопасное выполнение работ. Для этой цели служат ограждения, защитное заземление, блокировки, сигнализация, рубильники в цепи питания установок, предупреждающие и запрещающие надписи.

В процессе работы при включенной установке запрещается:

1. Оставлять установку, находящуюся под напряжением, без присмотра.
2. Закорачивать или отключать блокировочные устройства.
3. Находиться в зоне прямого или переотраженного лазерного излучения.
4. Категорически запрещается без защитных очков визуально наблюдать генерацию как в прямых, так и в отраженных лучах.

# Р а б о т а 1. ИССЛЕДОВАНИЕ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА С ВОЛНОВЫМ СЕЛЕКТОРОМ

## Цель работы

1. Изучение принципа действия и устройства CO<sub>2</sub>-лазера.
2. Исследование основных характеристик CO<sub>2</sub>-лазера с диспергирующим элементом.

Л и т е р а т у р а : [1–4]

## Общие сведения

В CO<sub>2</sub>-лазере используется переход между колебательно-вращательными уровнями основного электронного состояния молекулы CO<sub>2</sub>. Схема энергетических колебательных уровней молекулы CO<sub>2</sub> показана на рис. 1.1. Молекула CO<sub>2</sub> имеет четыре колебательные степени свободы: симметричную  $\nu_1$ , дважды вырожденную деформационную  $\nu_2$  и антисимметричную  $\nu_3$ . Обертон колебания  $\nu_2$  02<sup>0</sup>0 по энергии весьма близок к уровню 10<sup>0</sup>0 и имеет такую же симметрию, что обуславливает сильное проявление взаимодействия (резонанс Ферми) между этими состояниями. Справа на рис. 1.1 показано положение уровня молекулы N<sub>2</sub> в возбужденном колебательном состоянии  $\nu = 1$ . Сечения возбуждения колебательных уровней электронным ударом N<sub>2</sub> и образующейся в разряде

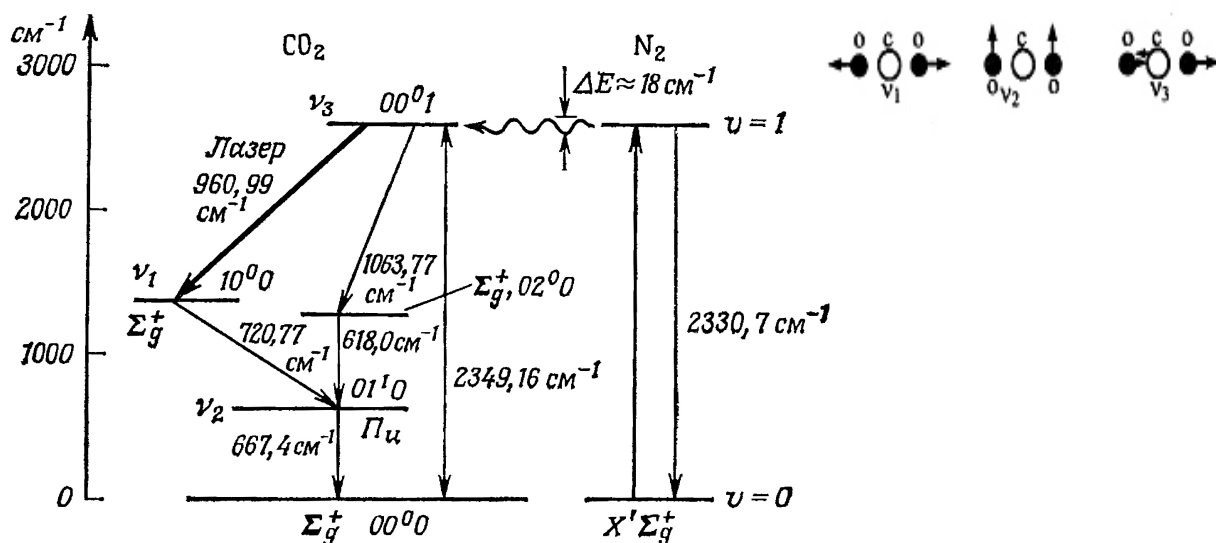


Рис. 1.1. Структура колебательных энергетических уровней молекул CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>

молекулы CO весьма велики; максимум кривой зависимости этих сечений от энергии электронов находится вблизи 2 – 3 эВ. Азот специально добавляется к CO<sub>2</sub> для повышения мощности лазера. Молекулы N<sub>2</sub> не имеют постоянного дипольного момента и, следовательно, не могут релаксировать излучательно. Энергия колебательных уровней N<sub>2</sub> и CO с точностью до  $kT_2$  ( $T_2$  – температура газа) совпадает с энергией верхнего лазерного уровня 00<sup>0</sup>1 CO<sub>2</sub>. Благодаря этому происходит резонансная передача энергии колебаний от молекул N<sub>2</sub> и CO молекуле CO<sub>2</sub>, чем и обеспечивается чрезвычайно эффективная накачка верхнего лазерного уровня.

Высокоэффективный механизм накачки наряду с благоприятными временами жизни верхнего и нижних энергетических уровней (они указаны на диаграмме) обеспечивает КПД CO<sub>2</sub>-лазера близкий к предельно возможному для данной системы уровню – 40 %.

Разрушение нижних лазерных уровней 10<sup>0</sup>0 и 02<sup>0</sup>0 осуществляется в основном не за счет радиационных процессов, а за счет соударений с тяжелыми частицами. Доказано, что добавка гелия способствует опустошению нижних лазерных уровней. Кроме того, благодаря высокой теплопроводности способствует снижению общей температуры газа. Этим и обеспечивается возможность повышения мощности генерации при добавлении гелия.

CO<sub>2</sub>-лазер может работать на переходе 00<sup>0</sup>1 → 10<sup>0</sup>0 ( $\lambda \approx 10,6$  мкм) и на переходе 00<sup>0</sup>1 → 02<sup>0</sup>0 ( $\lambda \approx 9,6$  мкм). Наличие резонанса Ферми между нижними лазерными уровнями дополнительно способствует стоку энергии вниз, независимо от того, какой переход используется. Большим усилением обладает переход на длине волны 10,6 мкм, поэтому, если не приняты специальные меры, лазер и работает на этом переходе.

На каждом из указанных переходов CO<sub>2</sub>-лазер может в принципе излучать на большом числе фиксированных частот, соответствующих  $P$  и  $R$  ветвям вращательно-колебательных переходов. Экспериментально наблюдалась генерация вплоть до значений  $J = 50^0$  ( $J$  – вращательное квантовое число). Линии с нечетными  $J$  в спектре CO<sub>2</sub> отсутствуют по соображениям симметрии. Ти-

пичный вид спектра излучения полосы  $00^0_1 - 10^0_0$ , содержащей  $P$  и  $R$  ветви, показан на рис. 1.2.

Если резонатор лазера не обладает селективными свойствами, то обычно генерация возникает на самых сильных линиях  $P$  ветви перехода  $00^0_1 - 10^0_0$  (линии  $P(18)$ ,  $P(20)$ ,  $P(22)$ ). Для получения генерации на любой из линий  $P$  и  $R$  ветвей перехода  $00^0_1 - 10^0_0$  или  $00^0_1 - 02^0_0$  резонатор лазера должен вносить сильные потери на всех волнах, кроме заданной. Элемент резонатора, обладающий такими свойствами, может быть назван волновым селектором. Таким элементом может служить поглотитель с требуемой формой кривой пропускания, либо диспергирующее устройство, направляющее излучение в различных направлениях в зависимости от длины волны. В качестве диспергирующего элемента может быть выбрана призма, либо наклонный эталон Фабри-Перо, либо дифракционная решетка. Селектор должен обладать низкими потерями для выбранной волны, высокой волновой избирательностью (или угловой дисперсией) в соответствующей полосе спектра. Для селекции волн  $\text{CO}_2$ -лазера оптимальным селектором является, по-видимому, отражательная дифракционная решетка типа эшелетт, устанавливаемая вместо одного из зеркал открытого резонатора лазера.

При установке решетки нормально к оси лазера луч, испускаемый ла-

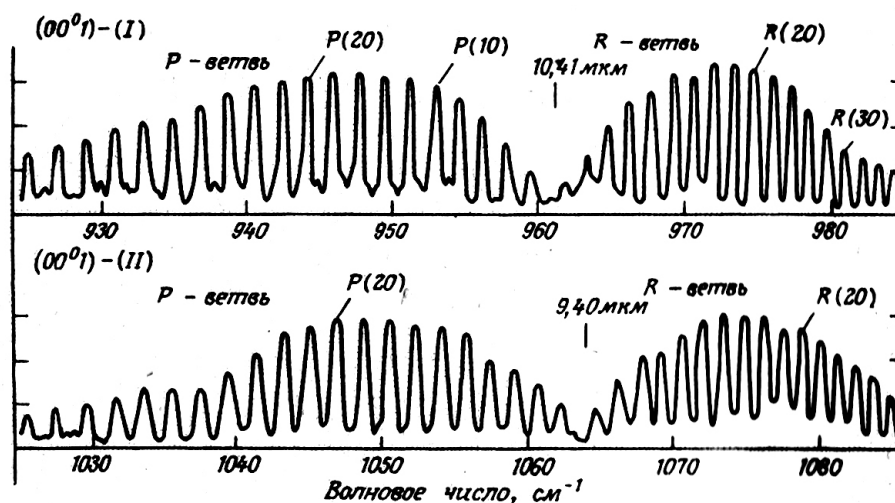


Рис. 1.2. Спектр излучения молекулы  $\text{CO}_2$  — колебательные полосы в области 9,4 мкм и 10,4 мкм

зерной средой в направлении решетки, будет отражаться в различных направлениях, согласно основному уравнению решетки  $m\lambda = d \sin \varphi$ , где  $m$  – любое целое число, определяющее "порядок дифракции", максимальное значение которого определяется из условия, чтобы значение  $\sin \varphi$  не превышало единицы,  $\lambda$  – длина волны,  $d$  – период решетки,  $\varphi$  – угол, определяющий направление дифрагированных лучей. При наклонном падении луча на решетку (см. рис. 1.3) с углом падения  $\psi$  уравнение решетки имеет вид  $m\lambda = d (\sin \varphi + \sin \psi)$ .

Для работы решетки в качестве селектора применяется так называемое автоколлимационное положение решетки, когда  $\psi = \varphi$ . В этом случае решетка повернута так, что в направлении оси лазера распространяется дифрагированный луч +1-го порядка. Уравнение решетки в режиме автоколлимации имеет вид  $\lambda = 2 d \sin \varphi$ , т.к.  $m = 1$ , а  $\psi = \varphi$ .

Выбор волны, на которой должен работать лазер, осуществляется поворотом решетки так, чтобы на данной волне удовлетворялось это уравнение. Поскольку для любой решетки часть мощности дифрагирует в "нулевой" порядок,

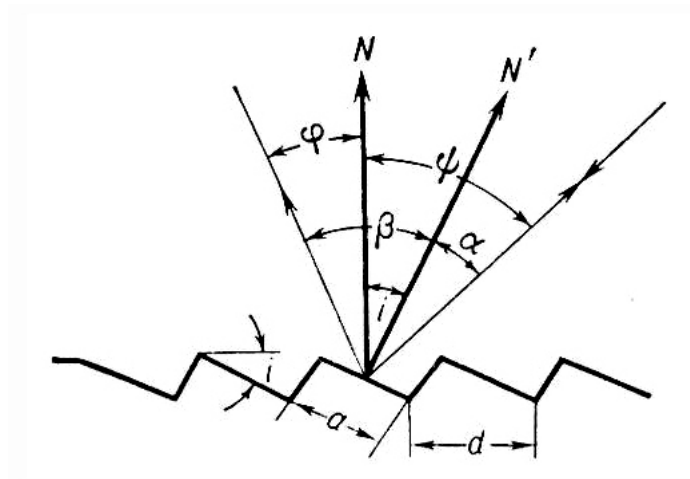


Рис. 1.3. Схематическое изображение участка поверхности эшелетта и хода лучей, падающих на него и дифрагирующих на нём:  $a$  – ширина зеркальной грани штриха;  $d$  – постоянная эшелетта;  $N$  – нормаль к общей поверхности эшелетта;  $N'$  – нормаль к зеркальной грани штриха,  $i$  – «угол блеска»;  $\psi$  – угол падения лучей на эшелетт;  $\varphi$  – угол дифракции;  $\alpha$  – угол падения лучей на зеркальную грань штриха;  $\beta$  – угол дифракции от зеркальной грани штриха



то обычно эту мощность и используют как выходную мощность лазера. Т.к. при повороте решетки происходит изменение направления положения "нулевого" максимума, то обычно этот поворот компенсируют вспомогательным зеркалом. Распределение мощности между первым и нулевым порядками дифракции определяется при заданной  $\lambda$  и  $d$  профилем эшелетта, точнее величиной наклона ступеньки или так называемым "углом блеска". Для применяемой в работе решетки этот угол  $i = 30^{\circ}10'$ .

Эффективность работы решетки в качестве волнового селектора будет тем выше, чем больше ее разрешающая сила  $R = \lambda / \Delta\lambda$  и угловая дисперсия  $d\varphi / d\lambda$ . Для автоколлимационной установки решетки

$$R = \frac{2L}{\lambda} \sin \varphi$$

где  $L$  – поперечный размер "пятна" поля на решетке, а

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = 2 \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\lambda}.$$

### **Лабораторное задание**

1. Изучить принцип действия  $\text{CO}_2$ -лазера. Ознакомиться с диаграммой энергетических уровней, спектром излучения, методом селекции волн с помощью дифракционной решетки типа эшелетт.
2. Провести измерение вращательно-колебательного спектра излучения  $\text{CO}_2$ -лазера. Провести идентификацию переходов.
3. Провести исследование свойств волнового селектора.
4. Провести измерение зависимости интенсивности излучения лазера от давления и состава смеси газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{He}$  и разрядного тока.

### **Методика и порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с блок-схемой  $\text{CO}_2$ -лазера с волновым селектором и экспериментальной установки для его исследования, приведенной на рис. 1.4.

Особенностью конструкции данного  $\text{CO}_2$ -лазера является расположение эшелетта непосредственно в разрядной полости, что исключает из резонатора

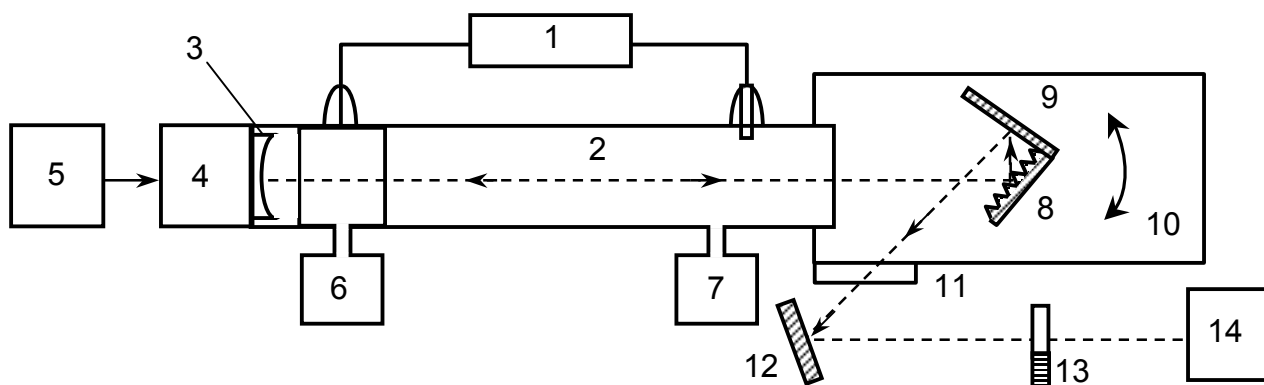


Рис. 1.4. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – высоковольтный источник питания  $\text{CO}_2$ -лазера; 2 – разрядная трубка; 3 – сферическое зеркало; 4 – пьезоэлемент; 5 – источник напряжения постоянного тока; 6 – система откачки  $\text{CO}_2$ -лазера; 7 – система напуска рабочей смеси  $\text{CO}_2$ -лазера; 8 – эшелетт; 9 – угольный отражатель; 10 – механизм юстировки эшелетта; 11 – пластина  $\text{NaCl}$ ; 12 – плоское зеркало; 13 – секторный ослабитель, 14 – calorиметрический измеритель мощности

лазера дополнительный элемент (окно Брюстера) и повышает выходную мощность лазера и ее стабильность. Лазер состоит из разрядной трубки 2 с внутренними электродами. Разрядная трубка расположена в станине резонатора, образованного четырьмя инваровыми стержнями и с двух сторон заканчивается шлифами, посредством которых производится ее герметизация. Она охлаждается проточной водой, циркулирующей в промежутке между разрядной трубкой и внешней стеклянной трубкой. Разработанный  $\text{CO}_2$ -лазер имеет длину разрядного промежутка 1,5 м с внутренним диаметром разрядной трубки 18 мм. Газы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{He}$  поступают в трубку через натекательные вентили и давление их контролируется манометром. Рабочая смесь этих газов в соотношении 1:1:4 при суммарном давлении 1333 Па прокачивается со скоростью около  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$ . Тлеющий разряд осуществляется от источника 1 постоянного напряжения величиной 20 кВ при токе разряда 30 мА через балластное сопротивление, ограничивающее величину пульсаций тока разряда.

Резонатор лазера образован охлаждаемым проточной водой медным зеркалом 3 с радиусом кривизны 10 м и эшелеттом 8 (100 штр/мм), разнесенными

на расстояние  $\sim 1,7$  м. Зеркало резонатора 3 закреплено на пьезокорректоре 4, что обеспечивает возможность плавной перестройки частоты в границах контура усиления лазера с помощью источника постоянного тока 5. Эшелетт расположен непосредственно в разрядной полости и закреплен в механизме перестройки частоты 10, обеспечивающим его юстировку винтами, электрическое изолирование от корпуса лазера и воздушное охлаждение. Настройка эшелетта на любую линию генерации  $P$ - и  $R$ -ветвей осуществляется поворотом микрометрического винта. Для сохранения направления пучка выходного излучения при перестройке лазера использован уголкового отражатель 9. Выходная мощность лазера составляет не менее 15 Вт на любой линии  $P$  и  $R$  ветви. Индикация излучения осуществляется калориметрическим измерителем мощности ИМО-2Н 14, на который попадает излучение, отраженное от плоского зеркала 12 и ослабленное секторным ослабителем 13.

## 2. Измерение вращательно-колебательного спектра $\text{CO}_2$ -лазера.

Для проведения указанных измерений необходимо:

- а) Включить лазер (см. Приложение) и приборы.
- б) Снять зависимость уровня выходной мощности (по показаниям калориметрического измерителя мощности) от угла поворота решетки. Фиксировать только максимальные значения, соответствующие точной настройке резонатора на выбранный по  $J$  переход.
- в) Построить график полученной зависимости.
- г) Произвести идентификацию переходов, используя для этого известную линию поглощения  $\text{CO}_2$ -лазера молекулами  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$  или другими – по указанию преподавателя.

3. Используя полученные результаты в области значений  $J \sim 16 - 22$  перехода  $00^0_1 - 10^0_0$  определить угловую дисперсию решетки. Сравнить полученные результаты с расчетными. Точные значения длин волн, генерируемых  $\text{CO}_2$ -лазером, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Длина волны в вакууме, мкм	Частота, см <sup>-1</sup>	Переход	Длина волны в вакууме, мкм	Частота, см <sup>-1</sup>	Переход
Лазер на CO <sub>2</sub> Переходы в полосе (00°1) — (10°0) (R-ветвь)					
10,057895	994,2438	R (54)	10,194574	980,9139	R (28)
10,066650	993,3792	R (52)	10,207142	979,7061	R (26)
10,075698	992,4870	R (50)	10,220006	978,4730	R (24)
10,085041	991,5676	R (48)	10,233167	977,2146	R (22)
10,094676	990,6211	R (46)	10,246625	975,9311	R (20)
10,104605	989,6478	R (44)	10,260381	974,6226	R (18)
10,114826	988,6477	R (42)	10,274438	973,2892	R (16)
10,125340	987,6211	R (40)	10,288797	971,9309	R (14)
10,136146	986,5682	R (38)	10,303458	970,5479	R (12)
10,147246	985,4891	R (36)	10,318424	969,1402	R (10)
10,158637	984,3840	R (34)	10,333696	967,7079	R (8)
10,170323	983,2530	R (32)	10,349277	966,2510	R (6)
10,182301	982,0962	R (30)	10,365168	964,7697	R (4)
Лазер на CO <sub>2</sub> Переходы в полосе (00°1) — (10°0) (P-ветвь)					
10,440579	957,8012	P (4)	10,696386	934,8952	P (30)
10,458220	956,1857	P (6)	10,718560	932,9611	P (32)
10,476187	954,5458	P (8)	10,741113	931,0022	P (34)
10,494484	952,8816	P (10)	10,764052	929,0182	P (36)
10,513114	951,1930	P (12)	10,787380	927,0091	P (38)
10,532080	949,4800	P (14)	10,811105	924,9749	P (40)
10,551387	947,7427	P (16)	10,835231	922,9153	P (42)
10,571037	945,9810	P (18)	10,859765	920,8302	P (44)
10,591035	944,1948	P (20)	10,884713	918,7197	P (46)
10,611385	942,3841	P (22)	10,910082	916,5834	P (48)
10,632090	940,5488	P (24)	10,935879	914,4212	P (50)
10,653156	938,6890	P (26)	10,962110	912,2331	P (52)
10,674586	936,8045	P (28)	10,988783	910,0188	P (54)
			11,015906	907,7783	P (56)

4. Произвести измерение зависимости излучаемой мощности (по показаниям калориметрического измерителя мощности) при следующих режимах работы лазера:

- Установить разрядный ток – 25 мА и поддерживая это значение тока снять зависимость  $P_{\text{вых}}$  при изменении давления чистого CO<sub>2</sub>.
- То же – при давлении CO<sub>2</sub> равном 50 мм масляного столба + добавка N<sub>2</sub> (от 0 до 50 мм м.ст.).
- Установить давление CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> по 50 мм м.ст. и снять зависимость мощности на выходе при добавке гелия от 0 до 50 мм м.ст.

Построить все три зависимости на одном графике.

5. Снять зависимость  $P_{\text{вых}}$  от величины разрядного тока при оптимальном соотношении компонентов газовой смеси. Построить график.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Включение и выключение лазера

#### Порядок включения лазера

1. Включите форвакуумный насос.
2. Установите кран "Откачка" меткой влево или вправо и откачайте разрядную камеру до  $(1 \div 5) \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст.
3. С помощью натекателя "Газ" установите давление рабочей смеси  $18 \div 20$  мм рт.ст. по шкале вакуумметра.
4. Подключите сетевой шнур источника питания и блока АПЧ к сети 220 В, 50 Гц.
5. Включите тумблеры "Сеть" источника питания и блока АПЧ. При этом должны загореться индикаторные лампы сетевого напряжения. Допускается кратковременное загорание лампочки "Высокое" источника питания.
6. Прогрейте источник питания в течение не менее 5 мин и нажмите на 1–2 с кнопку "Высокое". При этом должна загореться индикаторная лампа высокого напряжения "Высокое" и на выходе появиться излучение.

ПРИМЕЧАНИЕ: При отсутствии излучения и тока излучателя по прибору "Ток разряда" нажмите кнопку "Поджиг" источника питания не более, чем на 1 с.

7. Установите ручкой "Ток разряда" источника питания оптимальный ток излучателя согласно п.2 по прибору "Ток разряда".
8. Убедитесь в наличии сигнала ошибки в блоке АПЧ, для этого:
  - переведите тумблер "Ис"–"Иу" блока АПЧ в положение "Ис";
  - нажмите на одну из кнопок "РПЧ", стрелка индикатора "Индикатор", находящегося на передней панели блока АПЧ, должна менять показания от минимального значения до максимального и обратно.
8. Настройте лазер на один из заданных переходов, для этого:
  - установите показания шкалы микрометрического винта, соответствующие

щие заданному переходу, согласно указанию преподавателя;

– переведите тумблер “Ис”-“Иу” в положение “Иу”, настройтесь на максимальную мощность излучения, нажимая на кнопки “РПЧ” на передней панели блока АПЧ. При этом управляющий сигнал должен быть минимальным.

ПРИМЕЧАНИЯ. 1. Настройка на любой другой заданный переход производится по вышеизложенной методике.

2. Дополнительной проверкой устойчивой работы блока АПЧ на одном из заданных переходов является отсутствие перемещения стрелки индикатора "Индикатор" при нажатии кнопки "+РПЧ" и "-РПЧ" при включенном тумблере "АПЧ".

#### Порядок выключения лазера

1. Поставьте тумблер "АПЧ" в положение "Откл".
2. Поставьте тумблер "Сеть" на передней панели блока “АПЧ” в положение "Откл".
3. Поставьте тумблер "Сеть" на передней панели источника питания в положение "Откл".
4. Отключите сетевые шнуры источника питания и блока АПЧ от сети.
7. Перекройте воду, подаваемую для охлаждения на излучатель.
8. Перекройте вакуумные краны.
9. Выключите форвакуумный насос.

#### **ВНИМАНИЕ!**

При работе с лазером строго соблюдать технику безопасности. Запрещается включать лазер без заземления и подачи проточной воды на излучатель. Запрещается работать с лазером при открытых кожухах излучателя и источника питания. В область луча не вносить рук и металлических предметов – возможны ожоги и повреждения глаз отраженным лучом. Установка работает под напряжением 20 кВ. Не прикасаться к панели либо элементам трубки!

#### **Контрольные вопросы**

1. Объясните структуру колебательных энергетических уровней молекул азота

и углекислого газа.

2. Укажите пути заполнения верхнего рабочего уровня и очищения нижнего рабочего уровня в  $\text{CO}_2$ -лазерах.
3. Какова роль гелия в процессе генерации  $\text{CO}_2$ -лазера.
4. Объясните роль волнового селектора в лазере.
5. Объясните принцип действия эшелетта.
6. Что такое автоколлимационный режим работы эшелетта?
7. Что такое угол блеска?
8. Дайте определение разрешающей способности и угловой дисперсии для дифракционного элемента и эшелетта.
9. Укажите основные особенности конструкции  $\text{CO}_2$ -лазера.
10. Объясните принцип действия калориметрического измерителя мощности.

## **Р а б о т а 2. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОЙ РАСХОДИМОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ЛАЗЕРА**

### **Цель работы**

1. Изучение методов измерения пространственных характеристик лазерных пучков, а также получение практических навыков работы с излучением лазеров субмиллиметрового диапазона длин волн.
2. Измерение расходимости излучения субмиллиметрового лазера методом двух сечений.

Литература: [5 – 8]

### **Общие сведения**

#### **1. Субмиллиметровый лазер с оптической накачкой**

Субмиллиметровый (СММ) лазер с оптической накачкой является сложной системой, включающей в себя резонатор ячейки, заполненный активным газом, лазер накачки, тракт, передающий излучение накачки к ячейке и формирующий пучок накачки заданной формы, а также аппаратуру, обеспечивающую электропитание, охлаждение, замену рабочих газов, контроль и автоматическую подстройку параметров рабочего режима.

Лазеры субмиллиметрового диапазона с накачкой  $\text{CO}_2$ -лазерами представляют собой источники, генерирующие когерентное излучение на многих дискретных частотах от дальней инфракрасной области спектра до области миллиметровых волн. Для накачки СММ лазеров обычно используется инфракрасное (ИК) излучение  $\text{CO}_2$ -лазера, которое избирательно возбуждает молекулярный газ (или пары), переводя его молекулы на определенный колебательно-вращательный уровень. Тогда за счет перехода между двумя близко расположенными вращательными уровнями возникает лазерное излучение (рис. 2.1). Излучение  $\text{CO}_2$ -лазера с длиной волны около 10 мкм поглощается на колебательно-вращательном переходе молекул  $\text{CH}_3\text{OH}$ , в результате чего молекулы переходят с уровня 1 на уровень 2. Вращательные уровни основного колебательного состояния бывают заселены под влиянием тепловых процессов, тогда



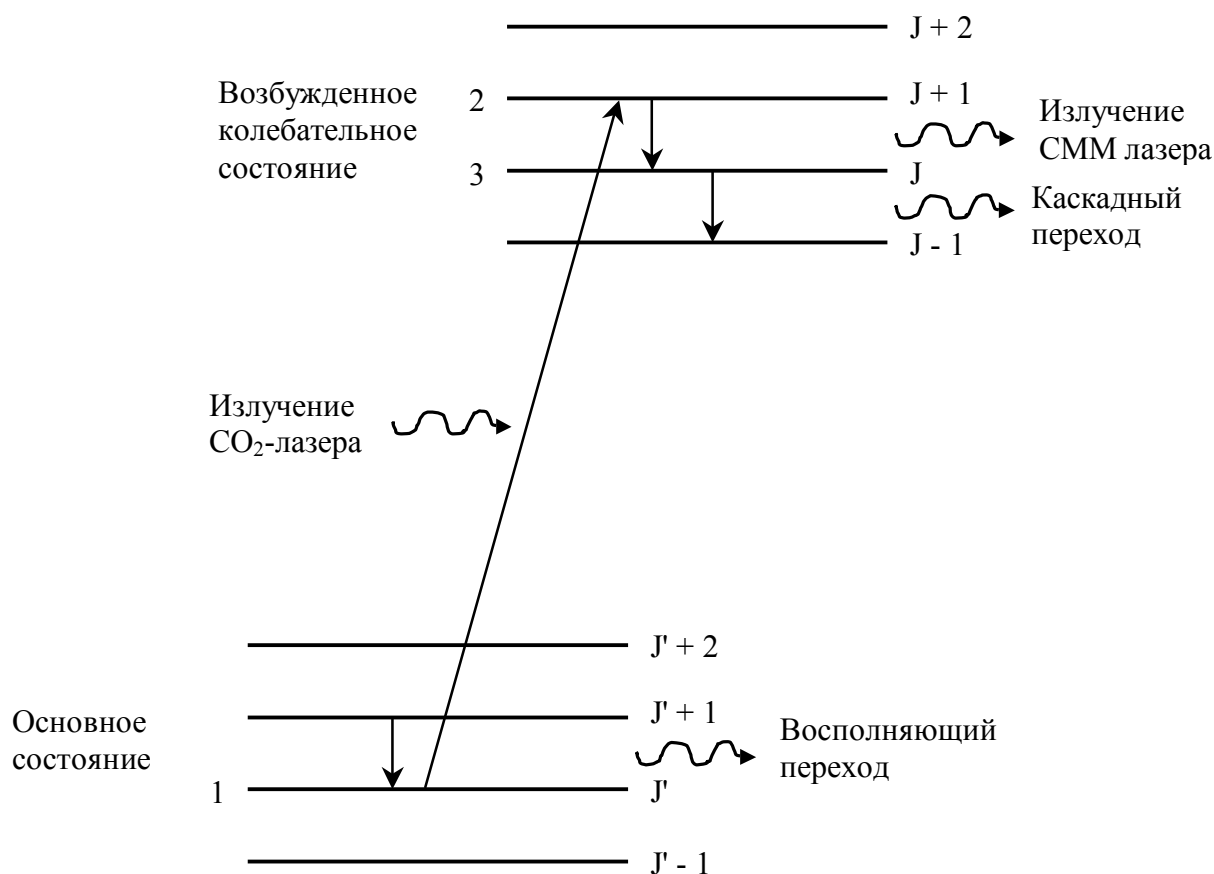


Рис. 2.1. Упрощенная схема энергетических уровней, иллюстрирующая генерацию субмиллиметрового излучения при оптической накачке

как вращательные уровни первого возбужденного колебательного состояния в соответствии с больцмановским распределением вначале практически не заселены. Накачка  $\text{CO}_2$ -лазером создает инверсию населенностей между уровнями 2 и 3 в возбужденном колебательном состоянии. В дополнение к лазерной генерации между этими уровнями при определенных обстоятельствах могут возникнуть каскадные переходы внутри возбужденного колебательного состояния.

Основное требование для работы СММ лазера – совпадение линий поглощения активной среды этого лазера с длиной волны лазера накачки; к тому же для получения чисто вращательных переходов молекулы активной среды должны обладать постоянным дипольным моментом. Поэтому большинство молекул СММ лазеров представляют собой симметричные или почти симметричные волчки.

При создании СММ лазеров прежде всего необходимо учитывать одно-

временное наличие в резонаторе СММ излучения и излучения накачки. Ввиду различия в коэффициентах пропускания оптических материалов для обоих лазерных излучений, в резонаторах СММ лазеров не используются окна, расположенные под углом Брюстера, а зеркала устанавливаются внутри вакуумной камеры. Для получения эффективной накачки излучение накачки должно достаточно хорошо заполнять резонансный объем СММ моды. Поскольку поглощение газов при требуемых низких давлениях мало, желательно организовать многократное прохождение излучения СО<sub>2</sub>-лазера через резонатор. Конструкция резонаторов СММ лазеров в большинстве случаев основана на использовании коллинеарной накачки, когда излучение накачки вводится в резонатор через малое отверстие, обычно расположенное в центре входного зеркала. Зеркало на выходном конце лазера должно обеспечивать оптимальный вывод СММ излучения и одновременно обладать высоким коэффициентом отражения для излучения СО<sub>2</sub>-лазера, с тем чтобы излучение накачки могло совершать в резонаторе большое число проходов.

По типу конструкции СММ лазеры можно разделить на две категории: лазеры с открытыми резонаторами (типа Фабри-Перо) и лазеры с волноводными резонаторами. Большинство применяемых сейчас СММ лазеров снабжено не резонаторами типа Фабри-Перо, а полыми волноводными резонаторами. Привлекательная особенность волноводных лазеров – их относительная компактность. В волноводном лазере стенки трубки ограничивают волновое поле и определяют его модовую структуру.

## 2. Методы измерения угловой расходимости излучения

Изменение распределения поля излучения лазера  $U(x, y)$  по мере распространения пучка описывается следующим выражением:

$$U(x', y') = \frac{1}{4\pi} \iint U(x, y) \frac{\exp(-ikr)}{r} \left\{ \left( ik + \frac{1}{r} \right) \vec{l}_z \vec{r}_0 + ik \vec{l}_z \vec{s} \right\} dx dy, \quad (2.1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $r$  – расстояние от источника до точки наблюдения;  $\vec{l}_z$  – единичный вектор оси  $Z$ ;  $\vec{s}$  – нормаль

фазового фронта;  $x, y$  – декартовы координаты.

При расчете поля с помощью выражения (2.1) обычно выделяют три зоны дифракции: ближнюю, промежуточную (Френеля) и дальнюю.

**Ближняя зона.** Эта зона находится в непосредственной близости от выходного зеркала лазера и простирается тем дальше, чем больше максимальный линейный размер зеркала. В этой зоне никакие приближения невозможны. Интеграл (2.1) должен вычисляться точно.

**Зона Френеля.** Здесь возможны упрощения:

1. Величиной  $1/r$  пренебрегают по сравнению с  $k$ , так как  $r \gg \lambda$ .
2. Полагают  $\vec{I}_z \vec{r}_0 = \cos \Theta$ .
3. Член  $1/r$  в амплитудном множителе заменяют на  $1/R$ , где  $R$  – расстояние от начала координат.
4. Изменение  $r$  в фазовом множителе  $e^{-ikr}$  приближенно выражается линейным и квадратичным членами:

$$r \approx z + \frac{(x - x')^2 + (y - y')^2}{2z}.$$

Таким образом, в зоне Френеля

$$U(x', y') = \frac{i \exp(-ikz)}{2\lambda R} \iint U(x, y) \left\{ -ik \left[ \frac{(x - x')^2 + (y - y')^2}{2z} \right] \right\} (1 + \cos \Theta) dx dy. \quad (2.2)$$

**Дальняя зона.** В этой зоне, называемой еще волновой, в фазовом множителе интеграла (2.1) пренебрежительно малы все члены выше первого порядка. Обычно в этой области интересуются околоосевой областью, считая  $\cos \Theta = 1$  и  $z = R$ . При этом

$$U(x', y') = \frac{i \exp(-ikR)}{\lambda R} \iint U(x, y) \left\{ -ik \frac{xx' + yy'}{R} \right\} dx dy. \quad (2.3)$$

В ближней и френелевской зонах поле имеет вид лучевой трубки, диаметр которой увеличивается с ростом расстояния. В большинстве случаев практический интерес представляет распределение поля излучения в дальней зоне,

когда форма распределения перестает зависеть от расстояния и можно говорить о сформировавшейся диаграмме направленности излучения.

В теории дифракции принято считать, что граница между дальней зоной и зоной Френеля лежит на таком расстоянии  $R$  от излучающего раскрыва, где разность хода лучей от его наиболее удаленных точек не превышает  $\lambda/16$ . Это расстояние связано с наибольшим размером раскрыва  $D$  следующим соотношением  $R = 2D^2 / \lambda$ .

В литературе используются два определения расходимости. В первом случае, говоря о расходимости, имеют в виду “расходимость по заданному уровню интенсивности”; это ширина диапазона углов, в котором интенсивность составляет не менее заданной от максимального значения. Во втором случае, говоря о расходимости, имеют в виду энергетическую расходимость, т.е. расходимость по заданному уровню энергии; это – угловой диаметр пучка в дальней зоне, который охватывает заданную часть всего потока излучения. Для практического определения расходимости используют два основных метода: метод сечений пучка в дальней зоне и метод фокального пятна (рис. 2.2).

**Метод сечений пучка.** Согласно этому методу расходимость  $\Theta$  пучка излучения определяют следующим образом: измеряют ширины  $a_1$  и  $a_2$  двух поперечных сечений  $z_1$  и  $z_2$  пучка в дальней зоне, расстояние между этими сечениями  $L$  и вычисляют искомый угол  $\Theta$  по формуле:

$$\Theta = \arctg \left[ \frac{a_2 - a_1}{z_2 - z_1} \right] \approx \frac{a_2 - a_1}{L} \quad (2.4)$$

Измерения ширины  $a_1$  и  $a_2$  поперечных сечений пучка производят по одному и тому же критерию – заданному уровню интенсивности либо заданной доле мощности. Достоинством этого метода является его простота, однако для обеспечения необходимой точности измерений требуется достаточно большое расстояние между сечениями.

**Метод фокального пятна.** Проведение измерений в дальней зоне требует, как правило, значительного удаления от источника излучения. Однако

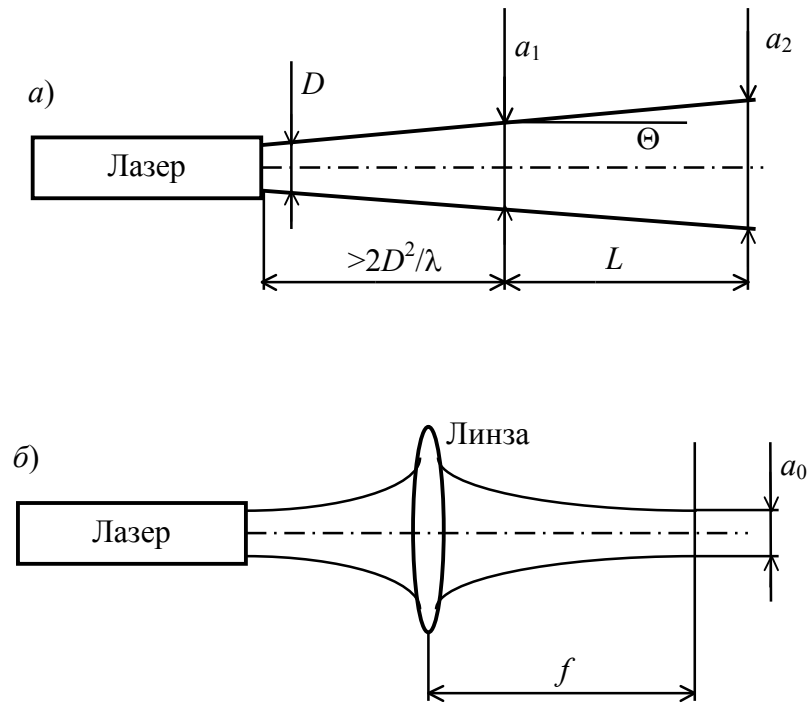


Рис. 2.2. Схемы измерения расходимости лазерного излучения методом сечений (а) и методом фокального пятна (б)

нетрудно добиться отсутствия квадратичных членов в выражении (2.1) и в непосредственной близости от источника излучения. Этого можно достигнуть, поместив на выходе источника квадратичный фазовый корректор. Простейшим устройством такого вида является обычная тонкая линза со сферическими поверхностями.

Как известно, прохождение расходящейся волны через положительную линзу равносильно умножению поля  $U(x, y)$ , определяемого выражением (2.1), на  $\exp[-(ik/2f)(x_1^2 + y_1^2)]$ , что приводит к взаимному сокращению квадратичных членов, если расстояние до плоскости наблюдения  $z$  равно фокусному расстоянию линзы  $f$ . В этом случае картина в фокальной плоскости подобна распределению в дальней зоне. Для перехода к угловому распределению необходимо линейное распределение в фокальной плоскости разделить на фокусное расстояние линзы  $f$ .

Угол расходимости излучения лазера  $\Theta$  определяют из соотношения:

$$\Theta \approx \arctg \frac{a_0}{f} \approx \frac{a_0}{f}, \quad (2.5)$$

где  $a_0$  – диаметр сечения пучка в фокальной плоскости. Поскольку угловое распределение излучения на любом удалении от лазера до линзы не играет роли, необходимо лишь, чтобы линза полностью “перехватывала” весь пучок излучения.

Одним из устройств измерения интенсивности энергии в лазерном пучке является пироэлектрический приёмник. Пироэлектрический приёмник относится к классу тепловых приёмников излучения. Его принцип действия основан на пироэлектрическом эффекте, заключающемся в изменении поляризации пироактивного кристалла при изменении его температуры. Выражение для пироэлектрического тока  $I$ , возникающего при изменении температуры пироэлектрика, имеет вид:

$$I = A_0 \gamma \frac{d(\Delta T)}{dt},$$

где  $\gamma$  – пироэлектрический коэффициент,  $A_0$  – площадь приемной поверхности. Отсюда следует, что выходной сигнал пироэлектрического приемника пропорционален не величине  $\Delta T$ , а изменению этой величины во времени  $d(\Delta T)/dt$ . Следствием этого является необходимость модуляции излучения при изменении пироприемником непрерывного излучения.

Пироэлектрические приемники конструируются двух типов: продольного, у которых направление потока излучения совпадает с направлением пироэлектрического тока, и поперечного, у которых они перпендикулярны (рис. 2.3).

Продольные приемники имеют относительно большую емкость, определяемую площадью электродов  $C_{||} = \varepsilon ab/d$ , что обуславливает, с одной стороны, большую постоянную времени  $\tau \sim 10^{-5} - 10^{-6}$  с, а с другой – более высокую чувствительность. Для приемником поперечного типа характерна меньшая емкость  $C_{\perp} = \varepsilon bd/a$  при тех же значениях размеров, что обуславливает меньшую постоянную времени  $\tau \sim 10^{-7} - 10^{-8}$  с, но и относительно меньшую чувствительность.

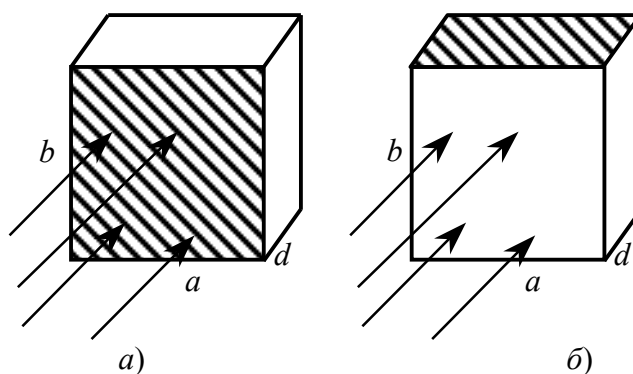


Рис. 2.3. Пирозлектрические приемники продольного (а) и поперечного (б) типов

### Лабораторное задание

1. Изучить принцип работы субмиллиметрового лазера на молекулах метилового спирта (длина волны излучения 0,1188 мм).
2. Изучить зоны дифракции лазерного пучка и приближения применяемые в этих зонах.
3. Изучить методы измерения угловой расходимости лазерного пучка.
4. Изучить принцип работы пирозлектрического приемника и устройства сканирования лазерного пучка.
5. Провести измерения поперечного распределения интенсивности лазерного пучка на различных расстояниях от выходного отражателя лазера.
6. Определить границу дальней зоны дифракции лазерного пучка.
7. Определить угловую расходимость лазерного пучка методом двух сечений.

### Методика и порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с блок-схемой измерительной установки, приведенной на рис. 2.4.

Измерительная установка работает следующим образом. Излучение  $\text{CO}_2$ -лазера 1 с длиной волны 10,6 мкм, модулированное механическим прерывателем 7, вводится с помощью поворотного и фокусирующего зеркал в полость резонатора СММ ячейки 2, заполненную парами метилового спирта ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). В результате оптической накачки в ячейке возникает генерация излу-

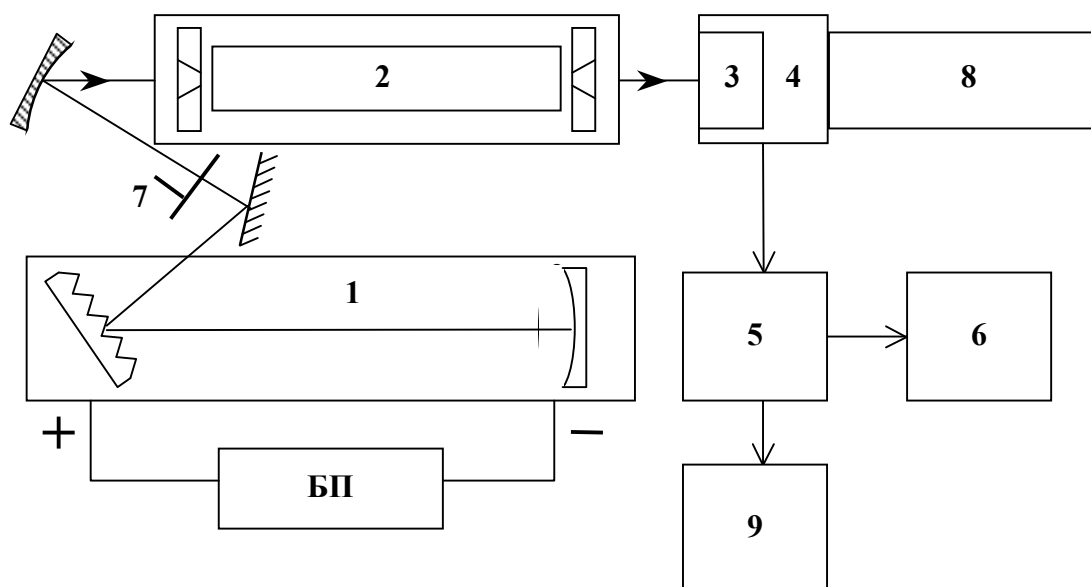


Рис. 2.4. 1 – CO<sub>2</sub>-лазер; 2 – СММ ячейка; 3 – пироэлектрический приемник; 4 – устройство поперечного сканирования лазерного пучка; 5 – усилитель; 6 – осциллограф; 7 – механический прерыватель; 8 – оптическая скамья; 9 – самописец

чения на длине волны  $\lambda = 0,1188$  мм. Пространственная структура СММ излучения формируется главным образом диэлектрическим волноводом (внутренний диаметр 36 мм), расположенным между отражателями ячейки и соответствует волноводной моде  $EH_{11}$ . Часть энергии генерации выводится из ячейки через отверстие диаметром 6 мм, расположенное в центре выходного отражателя. Сформированный выходным отверстием пучок СММ излучения детектируется пироэлектрическим приемником 3, размещенным в устройстве поперечного сканирования пучка 4. Сигнал пироэлектрического приемника усиливается усилителем 5 и регистрируется осциллографом 6 и самописцем 9.

2. Включить CO<sub>2</sub>-лазер и СММ ячейку и получить генерацию на линии метилового спирта с длиной волны 0,1188 мм (под непосредственным контролем преподавателя!). Включить механический прерыватель и регистрирующую аппаратуру. Дать прогреться измерительной установке в течение 30 минут.



## **ВНИМАНИЕ!**

При работе с CO<sub>2</sub>-лазером следует строго соблюдать правила техники безопасности. Источниками повышенной опасности являются:

- 1) постоянное напряжение до 15 кВ на аноде лазера;
- 2) инфракрасное излучение мощностью до 30 Вт.

**Следует избегать касания находящихся под напряжением частей лазера и работать в защитных очках.**

3. Зарегистрировать на самописце поперечное распределение интенсивности выходного излучения СММ лазера на расстояниях 50; 100; 200; 500 и 1000 мм от выходного отражателя, смещая устройство сканирования по оптической скамье.

4. Измерить ширину главного лепестка лазерного пучка на уровне интенсивности 0,5 от максимальной и построить график ее зависимости от расстояния до выходного отражателя лазера.

5. Определить угловую расходимость пучка методом сечений по ширине главного лепестка на уровне 0,5 в сечениях, расположенных от выходного отражателя лазера в дальней зоне дифракции волнового пучка.

## **Контрольные вопросы**

1. Объясните принцип работы субмиллиметрового лазера на молекулах метилового спирта.
2. Поясните конструктивные особенности резонаторов СММ лазеров.
3. Как изменяется поперечное распределение поля излучения лазера по мере распространения волнового пучка в свободном пространстве.
4. Дайте обоснование существования различных зон дифракции лазерных пучков и их границ.
5. Какие существуют методы измерения расходимости лазерного пучка.
6. Объясните принцип работы пироэлектрического приемника.
7. Как устроено устройство сканирования лазерного пучка?
8. С какой целью используется модуляция непрерывного излучения накачки?

### **Р а б о т а 3. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВ КОЛЕБАНИЙ ВОЛНОВОДНОГО ЛАЗЕРНОГО РЕЗОНАТОРА**

#### **Цель работы**

1. Изучение типов колебаний резонатора субмиллиметрового лазера на основе круглого металлического волновода.
2. Исследование основных характеристик типов колебаний металлического волноводного лазерного резонатора: энергетических потерь, частотных сдвигов и степени поляризации.

Литература: [6, 7, 9]

#### **Общие сведения**

Резонаторы субмиллиметровых (СММ) лазеров с оптической накачкой (ЛОН) могут быть открытыми, волноводными диэлектрическими или металлическими и комбинированными, т.е. состоящими из отрезков волноводов и участков свободного пространства. Использование открытых резонаторов в СММ лазерах не позволяет получить достаточную для практического использования мощность во всем диапазоне без замены элементов резонатора, поскольку при перестройке длины волны изменяется объем моды, а накачиваемый объем и размеры отверстия связи для вывода СММ излучения остаются неизменными. Следовательно, не обеспечиваются оптимальные условия накачки и потери на связь. Использование резонаторов на основе полых волноводов позволяет уменьшить эти недостатки, поскольку конфигурация моды в резонаторе слабо зависит от длины волны и задается, в основном, волноводом, расположенным между отражателями резонатора.

В субмиллиметровых лазерах, работающих в коротковолновой части диапазона, с успехом применяются резонаторы на основе полого диэлектрического волновода. Однако в длинноволновой части они имеют большие поперечные размеры, что приводит к снижению коэффициента усиления лазера. Поэтому, когда необходимо обеспечить компактность и широкодиапазонность лазера, предпочтительнее использовать резонаторы на основе металлического волно-

вода. При тех же габаритах они вносят меньший вклад в энергетические потери типов колебаний на больших длинах волн  $\lambda$ . Для них потери растут как  $\lambda^{3/2}$  в отличие от  $\lambda^2$  для диэлектрических волноводов. Преимуществом металлического волновода является и эффективный теплоотвод от активной среды при высоких мощностях накачки, особенно при наиболее часто применяемом способе накачки раструбом, когда инфракрасное излучение вводится в ячейку через малое отверстие в одном из отражателей и многократно взаимодействует со стенками волновода. К недостаткам металловолноводных резонаторов можно отнести многомодовость и меньшую степень поляризации выходного излучения лазера.

В круглом металлическом волноводе могут существовать два типа волн:  $TE_{nm}$  ( $H_{nm}$ ) и  $TM_{nm}$  ( $E_{nm}$ ). Индекс  $n$  определяет число стоячих волн укладываемых вдоль периметра волновода; индекс  $m$  определяет число полуволн, которые укладываются вдоль радиуса волновода [9]. Структура полей некоторых  $TE_{nm}$  и  $TM_{nm}$  волн в круглом металлическом волноводе представлена на рис. 3.1.

Постоянные распространения собственных волн определяются как:  $\gamma_{nm} = \beta_{nm} + i\alpha_{nm}$ , где  $\beta_{nm}$  – фазовые постоянные волн для волновода с идеально проводящими стенками,  $\alpha_{nm}$  – постоянные затухания волн, обусловленные омическими потерями в стенках волновода. Постоянные затухания для полей  $TE_{nm}$  и  $TM_{nm}$  запишем в виде:

$$\begin{aligned} \alpha(TE_{nm}) &= \frac{R_s}{\eta a_1} \left[ \frac{m^2}{\chi_{nm}^2 - m^2} + \left( \frac{\lambda}{\lambda_{kp}} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{kp}} \right) \right]^{-1/2}, \\ \alpha(TM_{nm}) &= \frac{R_s}{\eta a_1} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_{kp}} \right) \right]^{-1/2}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $R_s$  – поверхностное сопротивление стенок волновода (для меди оно равно  $2,61 \cdot 10^{-7} (c/\lambda)^{1/2}$ );  $\eta$  – волновое сопротивление свободного пространства, рав-

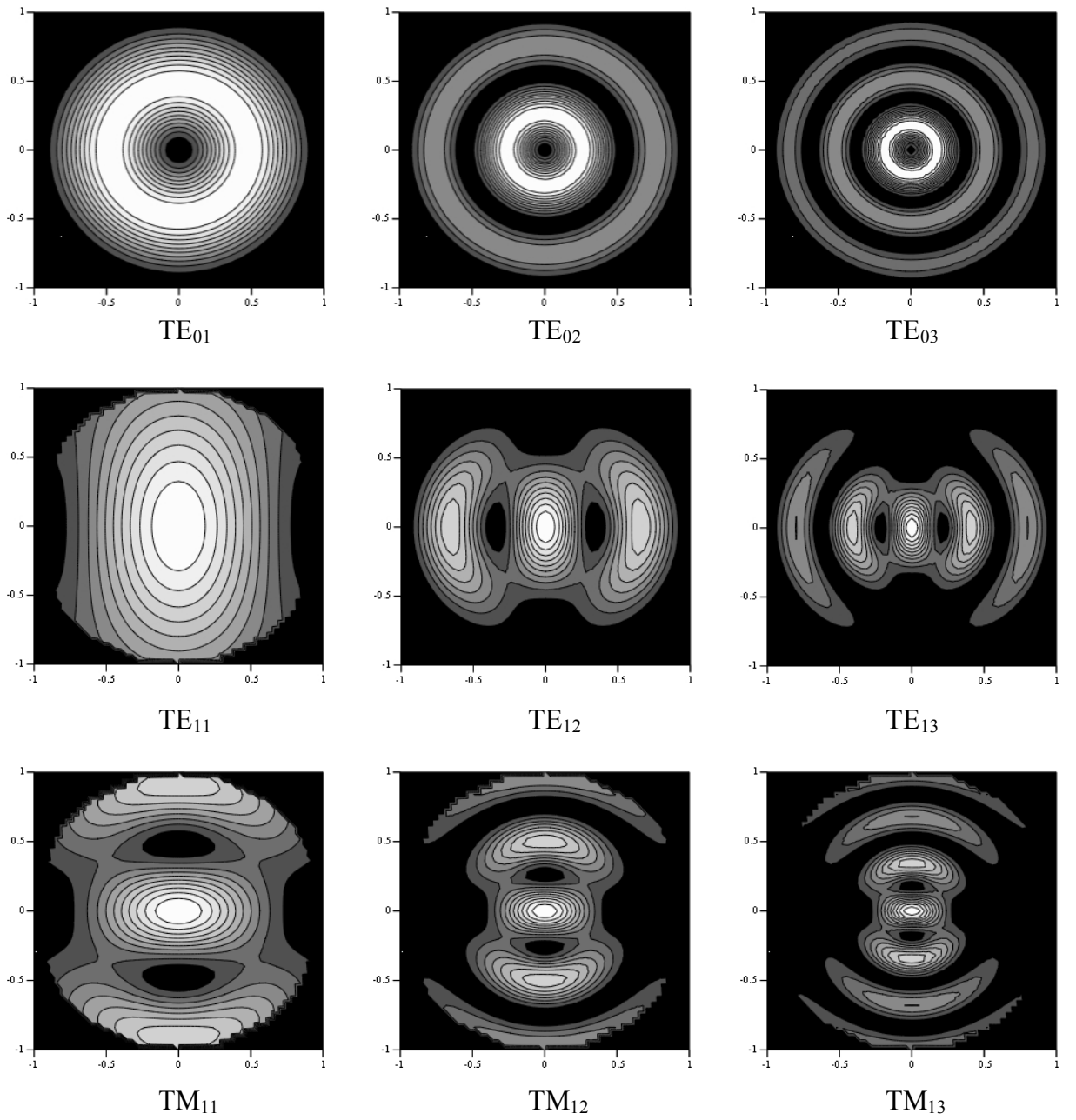


Рис. 3.1. Структура полей собственных типов колебаний круглого металлического волновода

ное  $376,73 \text{ Ом}$ ;  $\lambda_{kp} = \frac{2\pi a}{\chi_{nm}}$  – критическая длина волны;  $\chi_{nm}$  –  $m$ -й корень уравнения  $J'_n(\chi) = 0$  (см. табл. 3.1),  $a_1$  – радиус волновода. Фазовые постоянные для  $TE_{nm}$  и  $TM_{nm}$  волн имеют вид:

$$\beta_{nm} = \left[ \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 - \left( \frac{\chi_{nm}}{a_1} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (3.2)$$

Зависимости коэффициентов затухания  $\alpha_{nm}$  некоторых волн от длины

Таблица 3.1

$N$	$\chi_{n1}$	$\chi_{n2}$	$\chi_{n3}$	$\chi_{n4}$
0	3,83170	7,01558	10,17346	13,32369
1	1,84118	5,33144	8,53632	11,70600

волны  $\lambda$  в круглом металлическом волноводе приведены на рис. 3.2. Интерес представляют волны класса  $TE_{nm}$ , так как волны  $TM_{nm}$  обладают более высоким затуханием и редко наблюдаются в эксперименте.

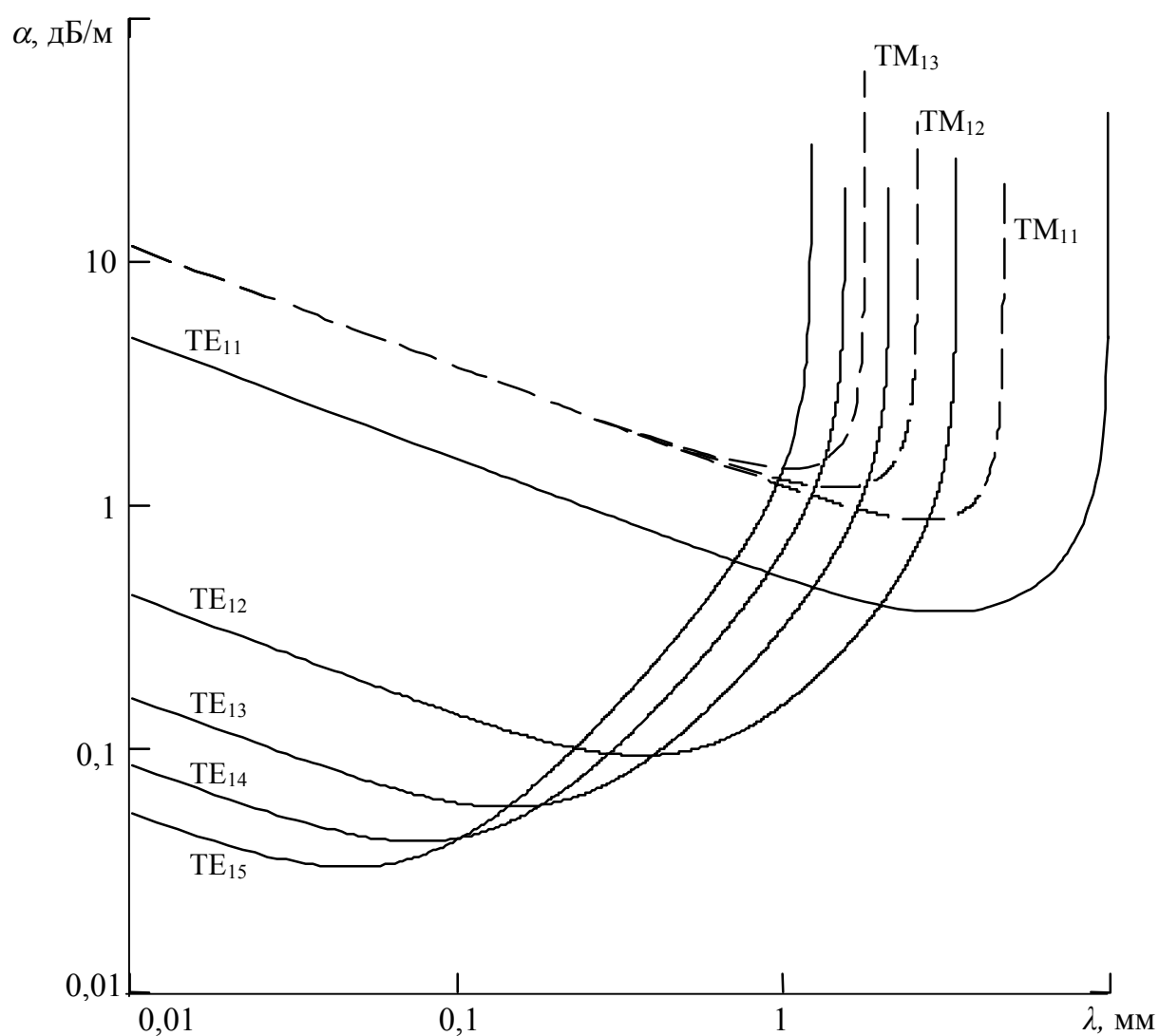


Рис. 3.2. Зависимости коэффициентов затухания  $\alpha$   $TE_{1m}$ - и  $TM_{1m}$ -волн от длины волны  $\lambda$  в круглом металлическом волноводе при  $2a_1 = 5,7$  мм

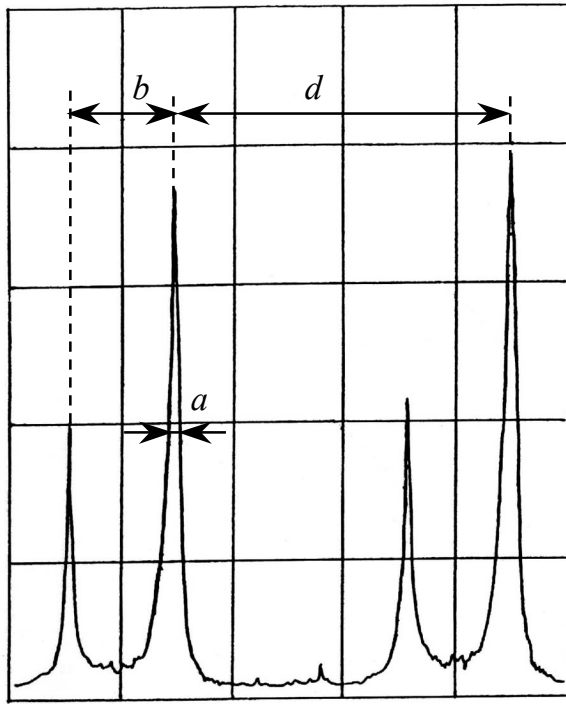


Рис. 3.3. Спектральная характеристика волноводного резонатора

Возбуждаемые в резонаторе типы колебаний характеризуются потерями энергии, степенью поляризации и частотным расстоянием между ними. Характерный вид экспериментальной спектральной характеристики волноводного резонатора приведен на рис. 3.3. Он получен при равномерном изменении длины резонатора. При этом спектр мод периодически повторяется с периодом соответствующим изменению длины на  $\lambda/2$ .

Спектральная характеристика несет информацию об энергетических потерях за круговой обход резонатора  $\delta$  и частотных межмодовых интервалах  $\Delta\nu$ , которые можно определить по формулам:

$$\delta = 1 - \exp\left(-\frac{2\pi a}{d}\right), \quad (3.3)$$

$$\Delta\nu \approx \frac{c}{2L} \cdot \frac{b}{d}, \quad (3.4)$$

где  $d$  – период спектра,  $a$  – ширина резонансной кривой моды на половине высоты,  $b$  – межмодовый интервал,  $c$  – скорость света в вакууме,  $L$  – длина резонатора.

Прежде всего требуется идентифицировать моды  $TE_{nm}$  в спектральной характеристике, т.е. определить какая из мод соответствует каждому резонансному пику. Идентификация производится, главным образом, путем сравнения межмодовых интервалов, определяемых по формуле (3.4) с рассчитанными по выражению:

$$\Delta \nu_{nm \overline{nm'}} = \frac{c}{2L} \left[ \frac{1}{4\pi^2 N} (\chi_{nm}^2 - \chi_{n'm'}^2) + (q - q') \right], \quad (3.5)$$

где  $N = a_1^2 / L\lambda$  – число Френеля. Продольные индексы  $q$  и  $q'$  выбираются таким образом, чтобы выражение в квадратных скобках было больше нуля, но меньше единицы. Вспомогательным методом идентификации является сравнение поперечного распределения интенсивности и степени поляризации поля на выходе из резонатора с известными теоретическими для  $TE_{nm}$  мод круглого металлического волновода. Расчетная степень поляризации моды  $TE_{11}$  близка к линейной и равна 92 %. Степень поляризации остальных мод класса  $TE_{1m}$  составляет около 50 %, а мод других классов близка к нулю. Это обстоятельство, а также то, что мода  $TE_{11}$  лучше всего возбуждается в эксперименте, позволяет её легко найти в спектральной характеристике. Она служит началом отсчета межмодовых интервалов.

### **Лабораторное задание**

1. Изучить механизм формирования типов колебаний в лазерном резонаторе на основе круглого металлического волновода с однородными отражателями.
2. Освоить методику регистрации спектра типов колебаний резонатора, включенного на проход, и измерения потерь энергии типа колебаний за круговой обход резонатора.
3. Изучить способы идентификации наблюдаемых пиков спектральной характеристики резонатора.
4. Провести измерения энергетических потерь и относительных частотных сдвигов наиболее добротных типов колебаний.

### **Методика и порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться со структурной блок-схемой измерительной установки, приведенной на рис. 3.4.

В качестве источника излучения используется СММ лазер 1 с оптической

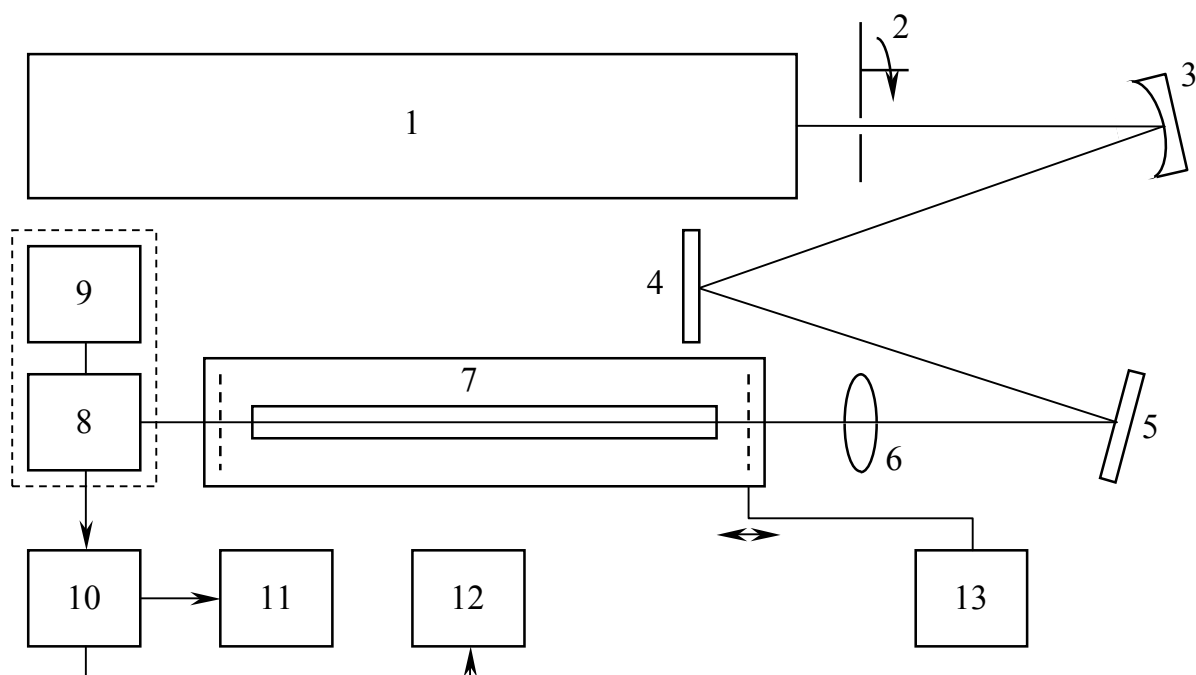


Рис. 3.4. Структурная схема экспериментального стенда для исследования волноводных резонаторов: 1 – СММ лазер с оптической накачкой; 2 – модулятор; 3 – сферическое зеркало; 4, 5 – плоские зеркала; 6 – линза; 7 – резонатор; 8 – пиродетектор; 9, 13 – электроприводы; 10 – селективный усилитель; 11 – самописец; 12 – осциллограф

накачкой, описанный в работе №2. Лазер работает на линии генерации муравьиной кислоты ( $\text{HCOOH}$ ) с длиной волны  $\lambda = 0,4326$  мкм (линия накачки  $\text{CO}_2$  лазера 9R20). Вывод излучения из лазера осуществляется через центральное отверстие связи диаметром 6 мм. Пучок выходного излучения в дальней зоне дифракции гауссоподобен и имеет линейную поляризацию. Он прерывается механическим модулятором 2 и затем с помощью квазиоптического тракта, состоящего из сферического 3 и плоских 4, 5 зеркал вводится в исследуемый резонатор 7. Для возбуждения высших мод резонатора используется тефлоновая линза 6 с фокусным расстоянием 30 см.

Резонатор образован отрезком медного волновода с внутренним диаметром  $2a_1 = 19,8$  мм и длиной  $L = 465$  мм и полупрозрачными отражателями, расположенными вблизи торцов волновода. В качестве отражателей используется двумерные периодические сетки из никелевых лент шириной 25 мкм и толщиной 17 мкм и периодом 100 мкм. Коэффициент пропускания отражателей составляет 6 %. Один из отражателей может перемещаться вдоль



оси резонатора с помощью электропривода 13.

За выходным отражателем расположен пироэлектрический детектор 8. Сигнал детектора усиливается селективным усилителем 10 типа У2-8 и регистрируется самопишущим прибором 11 типа КСП4 и электронным осциллографом 2.

2. Включить экспериментальную установку (под наблюдением преподавателя) и дать ей прогреться в течение 30 минут.

### **ВНИМАНИЕ!**

При работе с CO<sub>2</sub>-лазером следует строго соблюдать правила техники безопасности. Источниками повышенной опасности являются:

- 1) постоянное напряжение до 15 кВ на аноде лазера;
- 2) инфракрасное излучение мощностью до 30 Вт.

**Следует избегать касания находящихся под напряжением частей лазера и работать в защитных очках.**

3. Записать спектр резонатора и идентифицировать наблюдаемые типы колебаний. Для идентификации измерить степень поляризации выходящего из резонатора излучения для каждого типа колебаний и межмодовые интервалы.

Степень поляризации измерить с помощью анализатора (напыленная на полиэтиленовой пленке одномерная решетка) путем разделения излучения на две ортогонально поляризованные компоненты с максимальной  $J_{max}$  и минимальной  $J_{min}$  мощностями. Степень поляризации определить по формуле:

$$P = \frac{J_{max} - J_{min}}{J_{max} + J_{min}} \cdot 100\% . \quad (3.6)$$

Сравнить измеренные значения степени поляризации  $P$  с расчетными, приведенными в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Волноводная мода	TE <sub>11</sub>	TE <sub>12</sub>	TE <sub>13</sub>	TE <sub>1m</sub> , $m = 4, 5, 6, \dots$	TE <sub>0m</sub> , $m = 1, 2, 3, \dots$
$P$ , %	92	54	51	$\approx 50$	0

4. Идентифицировать резонаторные типы колебаний путем сравнения измеренных межмодовых интервалов  $\Delta\nu$  из выражения (3.4) с рассчитанными  $\Delta\nu_{nm\ n'm'}$  по формуле (3.5).

5. Определить энергетические потери резонаторных типов колебаний  $TE_{11}$ ,  $TE_{12}$  и  $TE_{01}$  по формуле (3.3). При необходимости оптимизировать согласование исследуемого типа колебаний с возбуждающим пучком с помощью поперечного и продольного смещений линзы 6 (рис. 3.4). Результаты измерений занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Тип колебаний	$a$ , мм	$b$ , мм	$\delta$ , %	$\Delta\nu$ , МГц	$\Pi$ , %
$TE_{11q}$					
$TE_{12q}$					
$TE_{01q}$					

### Контрольные вопросы

1. Какие типы волн существуют в круглом металлическом волноводе?
2. Как изменяется затухание мод в волноводе в зависимости от их индексов?
3. Объясните методику регистрации спектра типов колебаний резонатора.
4. Какую информацию несет спектральная характеристика резонатора?
5. Назовите способы идентификации наблюдаемых пиков перестроечной характеристики резонатора.
6. Поясните методику измерения степени поляризации излучения.
7. Для чего при возбуждении исследуемого резонатора используется тефлоновая линза?

## **Р а б о т а 4. ИССЛЕДОВАНИЕ CO<sub>2</sub>–ЛАЗЕРА С НЕОДНОРОДНЫМ ЗЕРКАЛОМ**

### **Цель работы**

1. Изучение принципа действия, устройства, конструктивных особенностей CO<sub>2</sub>-лазера с обобщенным конфокальным резонатором.
2. Исследование пространственно-энергетических характеристик CO<sub>2</sub>-лазера с обобщенным конфокальным резонатором и неоднородным зеркалом.

Л и т е р а т у р а : [10 – 16]

### **Общие сведения**

#### **1. Обобщенные конфокальные резонаторы**

Для генерации основной поперечной моды резонатор лазера должен иметь минимальные дифракционные потери на основной моде и максимальные на первой и высших поперечных модах. В классе устойчивых резонаторов, состоящих из двух зеркал неограниченной апертуры и диафрагмы между ними, симметричный конфокальный резонатор обладает наибольшей селективностью. Но такой резонатор не позволяет эффективно использовать объем активного элемента лазера, т.к. диаметр основной моды, а соответственно и объем активного элемента участвующего в генерации, мал. Увеличить выходную мощность одномодового лазера можно, используя устойчивые резонаторы, эквивалентные конфокальному и содержащие фазовый корректор между зеркалами – обобщенные конфокальные резонаторы [10]. Наиболее селективными среди них являются также симметричные, удовлетворяющие условию:

$$(1 - L/2r) \cdot (1 - L/f) + L/r = 0,$$

где  $L$  – длина резонатора,  $r$  – радиус кривизны зеркала,  $f$  – фокусное расстояние фазового корректора. Роль фазового корректора в экспериментальных моделях резонаторов выполняет обычно сферическое зеркало или положительная линза.

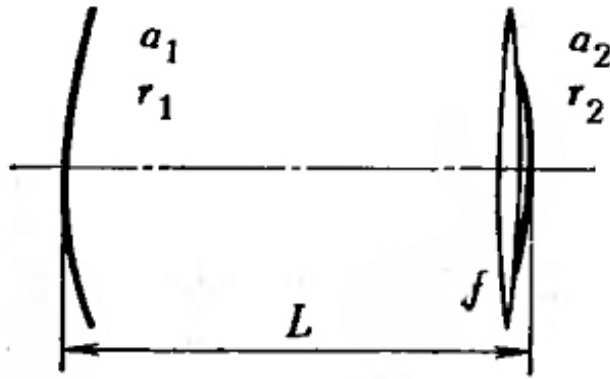


Рис. 4.1. Схема обобщенного конфокального резонатора с фазовым корректором возле одного из зеркал

В таких резонаторах возможно два варианта расположения фазовых корректоров. В первом случае линза с фокусным расстоянием  $f$  и сколь угодно большой апертурой помещена непосредственно перед одним из зеркал, например перед правым (рис. 4.1). Комбинация из зеркала радиуса  $r_2$  и линзы с фокусным расстоянием  $f$  оптически эквивалентна зеркалу радиуса  $r_2 f / (r_2 + f)$ . Следовательно, рассматриваемый на рис. 4.1 резонатор с линзой эквивалентен безлинзовому резонатору, правое зеркало которого имеет радиус кривизны  $r_2 f / (r_2 + f)$ . Параметры этого резонатора

$$N = \frac{a_1 a_2}{\lambda L}; \quad G_1 = \frac{a_1}{a_2} \left( 1 - \frac{L}{r_1} \right); \quad G_2 = \frac{a_2}{a_1} \left( 1 - L \frac{r_2 + f}{r_2 f} \right). \quad (4.1)$$

Более интересен практически случай, когда линза находится на некотором расстоянии от зеркал. Такой резонатор показан на рис. 4.2, а;  $d_1$  — расстоя-

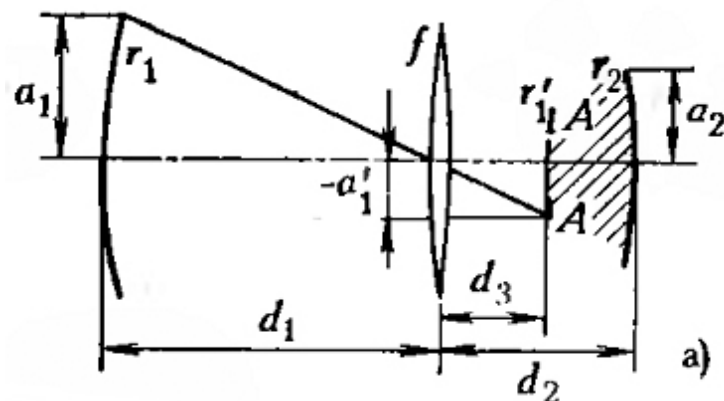


Рис. 4.2, а. Схема обобщенного конфокального резонатора с фазовым корректором на расстоянии от зеркал

ние до линзы от левого зеркала,  $d_2$  — от правого. Создаваемое линзой изображение левого зеркала (с распределением поля на нем) показано на рисунке в виде штриховой кривой  $AA'$ , отстоящей от линзы на расстоянии  $d_3$ ; радиус кривизны кривой  $AA'$  обозначим через  $r_1'$ . При этом  $a_1$  преобразуется линзой в  $-a_1'$  (см. рисунок 4.2, а). Заштрихованный на рисунке резонатор длиной  $d_2 - d_3$  есть безлинзовый резонатор, эквивалентный исходному резонатору с линзой. Воспользовавшись тем, что

$$d_3 = d_1 f / (d_1 - f); \quad a_1 / a_1' = -d_1 / d_3 = 1 - d_1 / f, \quad (4.2)$$

находим параметры  $N$  и  $G_2$  безлинзового эквивалентного резонатора

$$N = \frac{a_1' a_2}{\lambda(d_2 - d_3)} = \frac{a_1 a_2}{\lambda(d_1 + d_2 - d_1 d_2 / f)}; \quad (4.3)$$

$$G_2 = \frac{a_2}{a_1'} \left( 1 - \frac{d_2 - d_3}{r_2} \right) = \frac{a_2}{a_1} \left[ 1 - \frac{d_1}{f} - \frac{1}{r_2} \left( d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f} \right) \right].$$

Для определения параметра  $G_1$  рассмотрим другой эквивалентный безлинзовый резонатор. Этот резонатор показан штриховкой на рис. 4.2, б. Воспользуемся аналогией с рассмотренным ранее случаем. Поскольку

$$d_4 = d_2 f / (d_2 - f); \quad a_2 / a_2' = -d_2 / d_4 = 1 - d_2 / f, \quad (4.4)$$

то, следовательно,

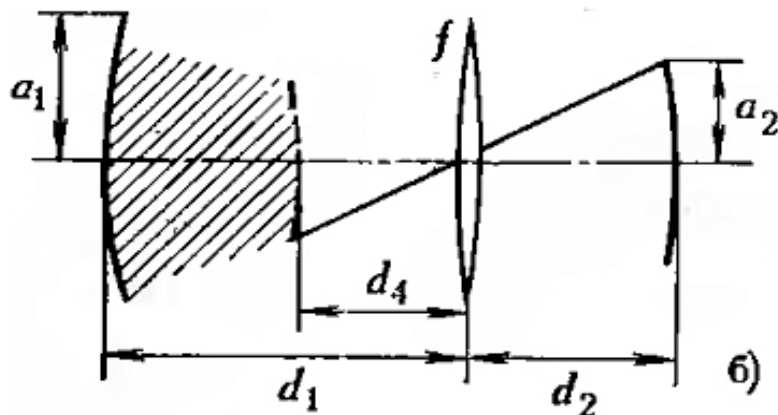


Рис. 4.2, б. Схема обобщенного конфокального резонатора с фазовым корректором на расстоянии от зеркал

$$N = \frac{a_1 a_2'}{\lambda(d_1 - d_4)} = \frac{a_1 a_2}{\lambda(d_1 + d_2 - d_1 d_2 / f)}; \quad (4.5)$$

$$G_1 = \frac{a_1}{a_2'} \left( 1 - \frac{d_1 - d_4}{r_1} \right) = \frac{a_1}{a_2} \left[ 1 - \frac{d_2}{f} - \frac{1}{r_1} \left( d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f} \right) \right].$$

Как и следовало ожидать, результаты (4.3) и (4.5) совпадают. Ведь каждый из заштрихованных на рис. 4.2 безлинзовых резонаторов эквивалентен исходному резонатору с линзой; следовательно, указанные безлинзовые резонаторы эквивалентны друг другу. Используя (4.3) и (4.5), выпишем параметры эквивалентного безлинзового резонатора

$$N = \frac{a_1 a_2}{\lambda(d_1 + d_2 - d_1 d_2 / f)};$$

$$G_1 = \frac{a_1}{a_2} \left[ 1 - \frac{d_2}{f} - \frac{1}{r_1} \left( d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f} \right) \right]; \quad (4.6)$$

$$G_2 = \frac{a_2}{a_1} \left[ 1 - \frac{d_1}{f} - \frac{1}{r_2} \left( d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f} \right) \right].$$

## 2. Методы формирования поперечных мод с заданным профилем выходного излучения в лазерных резонаторах

Для достижения оптимального результата в каждом практическом применении необходимо использовать определенное распределение интенсивности лазерного излучения. Такие распределения интенсивности волнового пучка в резонаторах обычно называют “специальными” (“custom”) модами, т.к. их пространственный профиль оптимизирован для конкретного применения. Для описания пространственных характеристик квантовых генераторов широко используется модель гауссового пучка. Однако в настоящее время для многих научных и прикладных применений требуется заданная форма поперечного пространственного распределения поля одномодового выходного пучка, отличающаяся от известных гауссовых распределений мод квазиоптических открытых резонаторов.

Большой практический интерес вызывают близкие к однородному попе-

речные распределения поля на выходном зеркале резонатора или в заданной плоскости вне резонатора. Например, при использовании квантовых генераторов в технологиях поверхностной обработки материалов, для отжига дефектов полупроводников, литографии, в системах оптоэлектронной обработки информации, разделения изотопов, лазерной печати, медицине, лабораторных исследованиях желательны пучки с равномерным поперечным распределением интенсивности, резко спадающим на краях апертуры [11].

Исследования по проблеме формирования лазерных пучков с заданным профилем выходного излучения сейчас активно развиваются в двух направлениях – внerezонаторные и внутрирезонаторные методы. В литературе известны различные методы формирования лазерных пучков с заданным профилем излучения с использованием внешних оптических устройств: асферических линз, зеркал, призм, конусов, пространственно-неоднородных светоделителей, бинарных фазовых фильтров, дифракционных решеток, голограмм, устройств на акустооптических и электрооптических эффектах, волноводов и т.д.

При внerezонаторном формировании выходного излучения задача формирования заданного поля сводится лишь к перераспределению энергии излучения в плоскости объекта. Предложенные устройства позволяют эффективно сформировать требуемый пучок излучения, но неизбежно приводят к усложнению лазерной системы, уменьшению ее надежности и дополнительным потерям энергии. Они разработаны для преобразования волновых пучков, имеющих заданный начальный профиль излучения (главным образом, гауссов). Когда условия облучения внешних устройств изменяются, эффективность формирования требуемых пучков излучения такими элементами заметно ухудшается.

Для преодоления данных недостатков в настоящее время активно развиваются альтернативные внутрирезонаторные методы формирования волновых пучков с заданным профилем излучения [12]. Внутрирезонаторная коррекция излучения имеет более широкие возможности. Внутрирезонаторное формирование влияет на полную мощность лазеров и изменяет их пространственно-энергетические, спектральные, корреляционные характеристики. Внутрирезо-

наторные элементы могут быть введены в лазерные резонаторы, чтобы сформировать определенные поперечные моды, выделить одну моду из множества мод, которые существуют в резонаторе. Большинство методов, используемых для формирования мод, применяются для изменения поперечного распределения поля самой низшей моды (обычно гауссового вида) в другое требуемое распределение, например, однородное (“flattened” или супергауссово), кольцевое (“doughnut”) и т.д.

В настоящее время для формирования заданного поля в открытых лазерных резонаторах широко применяются асферические фазосопряженные зеркала (“graded-phase mirrors”) [13]. Основой данного направления стали появившиеся в 60-х годах прошлого века работы Вахитова Н.Г., Власова С.Н., Космодемьянской Л.С. и др., где теоретически и экспериментально изучены пространственные и энергетические характеристики лазеров при использовании резонаторных зеркал с переменным по их сечению коэффициентом отражения. Впоследствии схемы резонаторов с подобными зеркалами (“variable reflectivity mirrors”) с различными законами изменения коэффициента отражения зеркал были предложены и реализованы как для устойчивых конфигураций резонаторов газовых He-Ne, TEA-CO<sub>2</sub>, XeCl-лазеров, так и неустойчивых резонансных систем твердотельных Nd:YAG-лазеров. Резонаторы с деформируемыми зеркалами привлекают все большее внимание с развитием методов и средств адаптивной оптики. Дифракционные оптические элементы также могут эффективно преобразовывать один волновой фронт излучения в другой. Такие элементы получили применение в резонансных системах Nd:YAG лазеров для формирования требуемых выходных пучков [14].

Учитывая вид Фурье–образа равномерной функции [15] и метод выделения поперечных мод при помощи кусочно-постоянного коэффициента отражения зеркала резонатора, сформулируем условия существования моды с однородным поперечным распределением амплитуды (фурье-моды), для определенности на выходном первом зеркале обобщенного конфокального резонатора (ОКР), вида:



$$\text{circ}(\rho) = \begin{cases} 1, & \rho \leq 1 \\ 0, & \rho > 1 \end{cases}. \quad (4.7)$$

где  $\rho$  – радиальная координата на зеркале.

Преобразование Фурье–Бесселя этой функции с точностью до постоянного множителя в случае бесконечного фазового корректора имеет вид функции “сомбреро”:

$$\text{somb}(\rho) = \frac{2J_1(C\rho)}{C\rho}, \quad (4.8)$$

где  $C = 2\pi N_{12}$ ;  $N_{12} = a_1 a_2 / \lambda f$  – число Френеля,  $J_1$  – функция Бесселя первого рода первого порядка.

Расположив поглощающие или рассеивающие элементы на обратном зеркале ОКР в координатах  $\rho_g = v_{1g} / 2\pi N_{12}$ , где  $v_{1g}$  – корни функции  $J_1$ ,  $g = 1, 2, 3, \dots$ , можно ожидать формирования моды с однородным поперечным распределением амплитуды (фурье-моды) на выходном зеркале лазерного резонатора и в ближней зоне дифракции возле него. При этом, поперечные размеры разнородных участков, на границах которых имеется скачок материальных постоянных, должны превышать длину волны. В областях с непрерывным изменением электродинамических свойств отражателей эти изменения пренебрежимо малы на размерах порядка  $\lambda$ .

Оценку степени равномерности поля в данных случаях будем проводить на основании нормированной абсолютной средней мерой различия  $\Pi$  [16], которая в случае сравнения с эталонным однородным полем лучше фиксирует однородность поля в центре пучка, чем более известная в литературе нормированная среднеквадратичная мера различия. Она имеет следующий вид

$$\Pi = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |1 - R(\rho_k)|, \quad (4.9)$$

где  $R(\rho)$  – сформированное распределение амплитуды или интенсивности поля,  $M$  – число точек дискретного задания поля.

## Лабораторное задание

1. Изучить механизм формирования типов колебаний в лазерном резонаторе на основе обобщенного конфокального резонатора.
2. Изучить принцип действия  $\text{CO}_2$ -лазера с обобщенным конфокальным резонатором.
3. Изучить механизм формирования выходного однородного поля при помощи пространственного фильтра на одном из зеркал лазерного резонатора.
4. Провести измерение радиальных распределений интенсивности выходного излучения  $\text{CO}_2$ -лазера на различных расстояниях от выходного отражателя лазера.
5. Определить угловую расходимость излучения лазера методом фокального пятна (см. работу №2).

## Методика и порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с блок-схемой измерительной установки, приведенной на рис. 4.3.

Разрядная камера исследуемого  $\text{CO}_2$ -лазера представляет собой стеклянную трубку 1 длиной 500 мм с внутренним диаметром 36 мм, заполненную рабочей газовой смесью состава  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe} = 1:1:4:0,25$ . Возбуждение  $\text{CO}_2$ -лазера производится посредством поперечного ВЧ-разряда. Для этого используются два осесимметрично расположенных вдоль трубки медных электрода 2 длиной 380 мм и шириной 15 мм. Частота ВЧ-генератора 3 составляет  $\sim 30$  МГц. Лазер работает в режиме с медленной прокачкой газовой смеси. Рабочее давление поддерживается примерно равным 10 мм. рт. ст.

Резонатор лазера образован двумя плоскими круглыми зеркалами 4 и 5 диаметром 10 мм каждое и сферическим зеркалом 6 (фазовый корректор, выполняющий роль элемента фурье-преобразования в теоретической модели лазерного резонатора) диаметром 30 мм с радиусом кривизны 1000 мм. Зеркало 6 изготовлено путем вакуумного напыления алюминия на стеклянную подложку и установлено на пьезоэлементе 8 типа КП-1, который обеспечивает дистанцион-

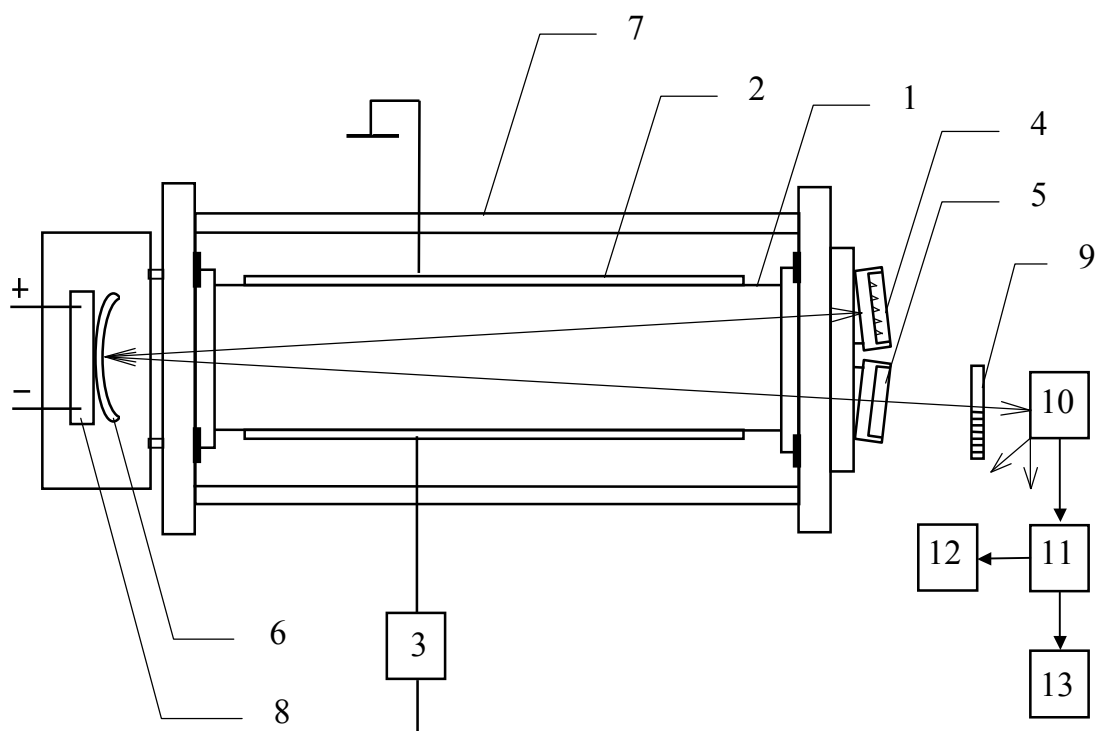


Рис. 4.3. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – стеклянная трубка; 2 – медные электроды; 3 – ВЧ-генератор; 4 – исследуемое зеркало; 5 – выходное зеркало; 6 – сферическое зеркало; 7 – инваровые стержни; 8 – пьезоэлемент типа КП-1; 9 – модулятор; 10 – пирозлектрический приемник; 11 – узкополосный усилитель типа У2-8; 12 – осциллограф; 13 – самописец

ную перестройку длины резонатора в пределах  $\pm 5$  мкм.

Отражатели закреплены в специальных юстировочных устройствах, герметично соединенных с разрядной камерой. Опорой резонатора служат четыре инваровых стержня 7. Вывод излучения осуществляется через плоское полупрозрачное германиевое зеркало 5 с коэффициентом пропускания 6 %. В качестве глухого отражателя 4 выбирается либо однородное алюминиевое зеркало на стеклянной подложке, либо алюминиевое зеркало с кусочно-постоянным коэффициентом отражения (амплитудный пространственный фильтр). Расстояние между центрами плоских отражателей 4 и 5 составляет 26 мм, что обеспечивает незначительные aberrации из-за малого угла падения излучения  $\varphi$  ( $\varphi \approx 1.5^\circ$ ) на фазовый корректор.

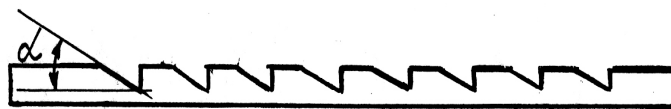


Рис. 4.4. Профиль амплитудно-ступенчатого зеркала на половине апертуры

Неоднородное зеркало изготовлено механическим методом с помощью специального резца в виде чередующихся отражающих колец и поглощающих излучение канавок. Поглощающие канавки протачивались резцом на глубину  $\sim 0,1$  мм ( $9,43\lambda$ ) под углом  $\alpha = 30^\circ$  к отражающей поверхности зеркала (рис. 4.4). Это обеспечивало вывод отраженных от поверхности канавок лучей из резонатора лазера, что аналогично практически полному поглощению излучения на этих участках зеркала. Измеренный диаметр центрального отражающего участка зеркала составляет  $1 \text{ мм} \pm 0.005 \text{ мм}$  ( $94,3\lambda \pm 0.5\lambda$ ).

Ширины поглощающих канавок и последующих отражающих колец приведены в табл. 4.1, где  $N$  – порядковый номер, показывающий расположение канавок и колец относительно центрального отражающего участка.

Таблица 4.1

#### Геометрические параметры амплитудного пространственного фильтра

$N$	1	2	3	4	5	6	7	8
Ширина канавки (мм, ед. $\lambda$ )	0,27 мм 25,47 $\lambda$	0,27 мм 25,47 $\lambda$	0,27 мм 25,47 $\lambda$	0,26 мм 25,53 $\lambda$	0,26 мм 25,53 $\lambda$	0,26 мм 25,53 $\lambda$	0,26 мм 25,53 $\lambda$	0,26 мм 25,53 $\lambda$
Ширина кольца (мм, ед. $\lambda$ )	0,28 мм 26,41 $\lambda$	0,28 мм 26,41 $\lambda$	0,29 мм 27,36 $\lambda$	0,29 мм 27,36 $\lambda$	0,3 мм 28,3 $\lambda$	0,3 мм 28,3 $\lambda$	0,29 мм 27,36 $\lambda$	0,36 мм 34,72 $\lambda$

Измерительная установка работает следующим образом. Выходное излучение  $\text{CO}_2$ -лазера, прошедшее механический прерыватель 9, регистрируется сканирующим пироэлектрическим приемником 10, обладающим пространственной разрешающей способностью порядка 0,5 мм, на заданном расстоянии от

полупрозрачного зеркала. Для обеспечения возможности исследования радиального распределения интенсивности излучения пироэлектрический детектор установлен на специальном устройстве, которое дает возможность перемещать его радиально при заданном азимуте поперек лазерного луча. Усиленный узкополосным усилителем 11 типа У2-8 сигнал приемника поступает на осциллограф 12 для визуального контроля, а продетектированный сигнал – на самописец 13, регистрирующий радиальное распределение интенсивности лазерного излучения. При этом обеспечивается временная синхронизация модернизированного самописца КСП-4 с устройством радиального сканирования пироэлектрического приемника.

2. Включить СО<sub>2</sub>-лазер. Включить механический прерыватель и регистрирующую аппаратуру. Дать прогреться измерительной установке в течение 30 минут.

### **ВНИМАНИЕ!**

При работе с лазером строго соблюдать технику безопасности. Запрещается включать лазер без заземления и подачи проточной воды на излучатель. Запрещается работать с лазером при открытых кожухах излучателя и источника питания. В область луча не вносить рук и металлических предметов. – возможны ожоги и повреждения глаз отраженным лучом. Установка работает под напряжением 3 кВ. Не прикасаться к панели либо элементам трубки !

3. Зарегистрировать на самописце поперечное распределение интенсивности выходного излучения СО<sub>2</sub>-лазера на различных расстояниях от выходного отражателя лазера, заданных преподавателем, смещая устройство сканирования по оптической скамье.

4. Произвести оценку степени однородности выходного излучения, используя формулу (4.9).

5. Для подтверждения получения на выходе СО<sub>2</sub>-лазера близкого к однородному радиального распределения интенсивности поля измерить поперечное распределение интенсивности излучения в фокусе положительной линзы с  $f =$

75 мм. Линзу установить так, чтобы одна из ее фокальных плоскостей совпадала с плоскостью выходного зеркала лазера. Тогда в другой ее фокальной плоскости можно снять картину распределения интенсивности пучка, которая будет фурье-образом функции, описывающей распределение поля, сформированного на полупрозрачном зеркале. В нашем случае это должна быть кривая, близкая к функции “сомбреро”.

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните механизм формирования типов колебаний в обобщенном конфокальном резонаторе.
2. Дайте определение параметров обобщенного конфокального резонатора с фазовым корректором возле одного из зеркал.
3. Дайте определение параметров обобщенного конфокального резонатора с фазовым корректором на расстоянии от зеркал.
4. Укажите методы формирования поперечных мод с заданным профилем выходного излучения в лазерных резонаторах.
5. Какова роль пространственного фильтра в схеме обобщенного конфокального резонатора исследуемого  $\text{CO}_2$ -лазера?
6. Какие существуют методы измерения расходимости лазерного пучка?
7. Объясните принцип работы пироэлектрического приемника.

## **Р а б о т а 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ЛАЗЕРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЛНОВОДНЫМ РЕЗОНАТОРОМ**

### **Цель работы**

1. Изучение принципа действия, устройства, конструктивных особенностей субмиллиметрового лазера с комбинированным волноводным резонатором.
2. Исследование основных характеристик субмиллиметрового лазера с комбинированным волноводным резонатором и неоднородным зеркалом.

Л и т е р а т у р а : [5, 17–19]

### **Общие сведения**

#### **1. Комбинированные волноводные резонаторы**

В последние годы в лазерах широко используются квазиоптические резонаторы, содержащие как открытые, так и волноводные участки, каждый из которых существенно влияет на формирование типов колебаний. Такие комбинированные резонаторы применяются в капиллярных газоразрядных лазерах, волноводных лазерах складной конструкции, субмиллиметровых (СММ) лазерах на свободных электронах [5, 17].

Резонаторы складной конструкции имеют два и более волновода, связанных квазиоптически с помощью системы поворотных зеркал (СПЗ). В литературе предложено использовать U- и V-конфигурации расположения волноводных каналов (рис. 5.1). Обычно используется СПЗ, состоящие из одного или двух зеркал. В первом случае зеркало располагается на пересечении осей сопрягаемых волноводов и может быть как плоским, так и сферическим. Плоское зеркало располагается на минимальном расстоянии от торцов волноводов для уменьшения потерь энергии мод, вызванных дифракцией на открытых участках. Для резонаторов на основе диэлектрических волноводов, работающих на моде  $EH_{11q}$ , потери пропорциональны величине  $(\lambda l/a^2)^{3/2}$ , где  $l$  – расстояние между волноводами вдоль оптической оси. Максимальная компактность резонатора достигается при использовании СПЗ из двух плоских зеркал, располо-

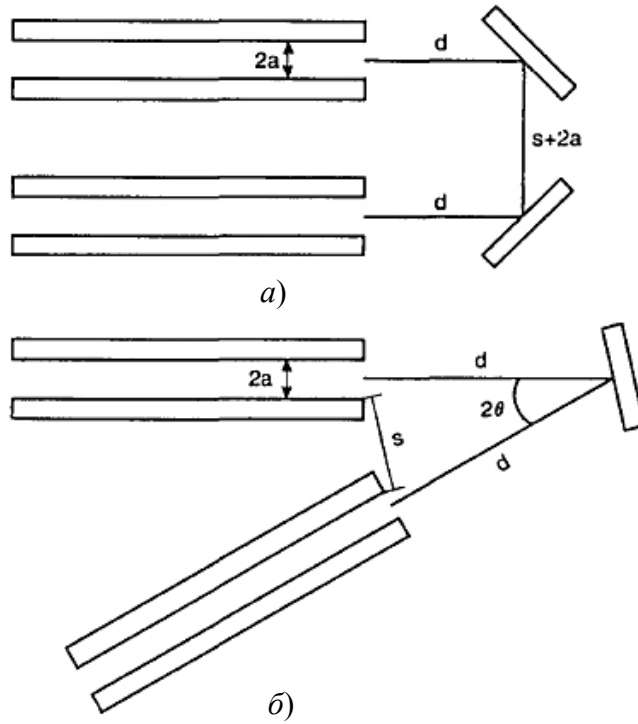


Рис. 5.1. Две схемы волноводных резонаторов складной конструкции:  
 $a$  – U-конфигурация,  $b$  – V-конфигурация

женных под углом  $45^\circ$  к осям сопрягаемых волноводов так, что волноводы взаимно параллельны. Уменьшить дифракционные потери на моде  $EH_{11q}$  можно в СПЗ, содержащей сферическое зеркало с радиусом кривизны  $R = 2\pi\omega^2/\lambda$ , где  $\omega = 0,6435a$ , расположенное на расстоянии  $R/2$  от торцов сопрягаемых волноводов. При использовании в СММ лазерах с оптической накачкой данная система вносит большие потери для излучения накачки.

В рассмотренных вариантах СПЗ потери сильно зависят от длины волны, что ограничивает рабочий диапазон длин волн. В [18] предложена система на основе двух сферических зеркал, эффективно работающая в достаточно широком диапазоне длин волн. На рис. 5.2 изображена оптическая схема СПЗ, сопрягающей волноводы 1 и 2. Система состоит из сферических зеркал 3, 4 и плоского зеркала 5. Благодаря последнему достигается параллельное расположение волноводов, а также малый угол между нормалью к отражающей поверхности сферического зеркала и оптической осью СПЗ, что необходимо для уменьшения внеосевой аберрации. Сферические зеркала представляют квадратичные фазовые корректоры.



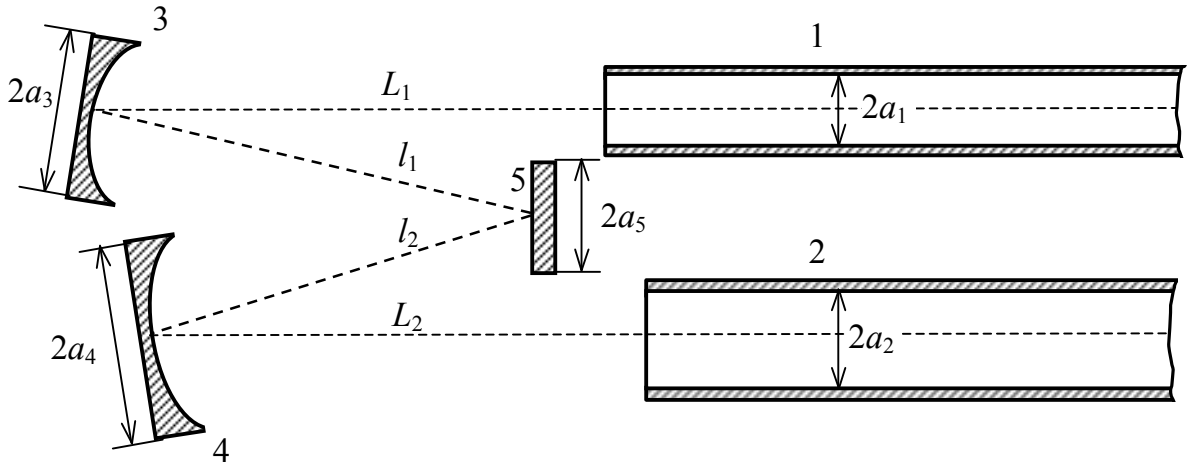


Рис. 5.2. Оптическая схема системы поворотных зеркал: 1, 2 – сопрягаемые волноводы; 3, 4 – сферические зеркала; 5 – плоское зеркало

Рассмотрим распространение пучка излучения из волновода 1 в волновод 2. Пусть на торце волновода 1, обращенном к системе сопряженных волноводов, распределение комплексной амплитуды поля  $U_1(x_1, y_1)$ . Тогда, пренебрегая виньетированием зеркал системы сопряжения волноводов и используя дифракционную формулу Френеля-Кирхгофа для описания распространения поля между апертурами зеркал и волноводов, получим выражение для комплексной амплитуды поля на входном торце волновода 2 в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 U_2(x_2, y_2) \approx & \frac{\exp\left\{-\frac{i\pi\alpha_2(x_2^2 + y_2^2)}{\lambda f_4}\right\}}{\lambda^2 f_3 f_4} \int_{-\infty}^{+\infty} U_1(x_1, y_1) \exp\left\{-\frac{i\pi\alpha_1(x_1^2 + y_1^2)}{\lambda f_3}\right\} \times \\
 & \times \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda f_3} \left[ 2(x_1 x + y_1 y) + \frac{2(x_2 x + y_2 y) f_3}{f_4} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \left( \gamma_1 + \frac{f_3}{f_4} \gamma_2 \right) (x^2 + y^2) \right] \right\} dx dy dx_1 dy_1, \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

где  $\alpha_1 = \frac{l_1 - f_3}{f_3}$ ;  $\alpha_2 = \frac{l_2 - f_4}{f_4}$ ;  $\gamma_1 = \frac{L_1 - f_3}{f_3}$ ;  $\gamma_2 = \frac{L_2 - f_4}{f_4}$ ;  $l_1 + l_2 = L$ ,  $x, y$  – координаты апертуры зеркала 5;  $x_1, y_1; x_2, y_2$  – координаты торцов волноводов 1 и 2, обращенных к фазовым корректорам 3 и 4 соответственно;  $l_1, l_2$  – расстояния по оптической оси резонатора между фазовыми корректорами 3, 4 соответственно и поворотным зеркалом 5. Знак приближенного равенства поставлен, т.к. уравнение (5.1) получено пренебрежением всех квадратичных форм, которые вытекают из величин  $\alpha_1$  и  $\gamma_1$ . Это оправдано, если принять во внимание следующие ограничения на линейные члены, состоящие из данных величин. Учитывая в (5.1), что

$$\left| \left( \gamma_1 + \frac{f_3}{f_4} \gamma_2 \right) \frac{(x^2 + y^2)}{\lambda f_3} \right| \ll 1,$$

получим значение внутреннего интеграла в форме

$$\delta \left( \frac{y_1}{\lambda f_3} + \frac{y_2}{\lambda f_4} \right) \cdot \delta \left( \frac{x_1}{\lambda f_3} + \frac{x_2}{\lambda f_4} \right),$$

где  $\delta$  – дельта-функция Дирака. Принимая во внимание свойство фильтрации этой функции, найдем из (5.1):

$$U_2(x_2, y_2) \approx \frac{f_3}{f_4} \exp \left\{ -\frac{i\pi}{\lambda f_3} \left( \alpha_2 + \alpha_1 \frac{f_3}{f_4} \right) (x_2^2 + y_2^2) \right\} U_1 \left( -\frac{f_3}{f_4} x_2, -\frac{f_3}{f_4} y_2 \right). \quad (5.2)$$

Из (5.2) следует, что при

$$\left| \left( \alpha_2 + \alpha_1 \frac{f_3}{f_4} \right) \frac{(x_2^2 + y_2^2)}{\lambda f_4} \right| \ll 1$$

распределение комплексной амплитуды на входе волновода 2 повторит распределение поля на входе волновода 1 с точностью до масштабного множителя  $K = f_4/f_3$ , где  $f_3, f_4$  – фокусные расстояния зеркал 3, 4. Приведем следующие условия выбора фокальных расстояний сферических зеркал при заданных поперечных

размерах волноводов и зеркал:

$$a_n \sqrt[3]{\frac{a_n}{\lambda_{\min}}} \ll f_{n+2} \ll \frac{a_{n+2} a_n}{\lambda_{\max}}, \quad (5.3)$$

$$f_{n+2} \ll \frac{a_5 a_n}{\lambda_{\max}}, \quad (5.4)$$

$$|(f_3 + f_4) - (l_1 + l_2)| \ll \frac{f_3 f_4 \lambda_{\min}}{a_1 a_2}, \quad (5.5)$$

$$\frac{|L_n - f_{n+2}|}{f_{n+2}} \ll 1, \quad n = 1, 2, \quad (5.6)$$

$$|f_4^2 (f_3 - L_1) + f_3^2 (f_4 - L_2)| \ll \frac{16 a_1^2 a_2^2 \lambda_{\min}}{\lambda_{\max}^2}, \quad (5.7)$$

где  $a_1, a_2$  – радиусы волноводов 1, 2;  $a_3, a_4, a_5$  – радиусы раскрывов апертур зеркал 3, 4, 5;  $L_1, L_2$  – расстояния вдоль оптической оси от волноводов 1, 2 до зеркал 3, 4 соответственно;  $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$  – минимальная и максимальная длины волн рабочего диапазона СПЗ. Соотношение (5.5) отражает тот факт, что расстояние вдоль оптической оси между фокусирующими зеркалами должно быть близко сумме их фокусных расстояний. Расстояния  $L_1$  и  $L_2$  должны быть близки фокусным расстояниям  $f_3, f_4$ . Если величины  $(L_1 - f_3)$  и  $(L_2 - f_4)$  имеют противоположные знаки, то они ограничены условием (5.6). Если эти величины имеют одинаковые знаки, то они ограничены гораздо более жестким условием (5.7). Очевидно, что с помощью данной СПЗ можно сопрягать волноводы, диаметры которых отличаются в  $K = a_1 / a_2$  раз.

Данная система была собрана и испытана в средней части СММ диапазона на длине волны  $\lambda = 0,57056$  мм (линия генерации молекулы  $\text{CH}_3\text{OH}$  с накачкой на переходе 9P16  $\text{CO}_2$ -лазера). Поворотные зеркала были изготовлены из нержавеющей стали с алюминиевым напылением и имели следующие параметры:  $f_3 = f_4 = 80$  мм,  $a_3 = a_4 = 20$  мм,  $a_5 = 10$  мм. Система использовалась для сопряжения медных волноводов с внутренним диаметром  $2a = 19,8$  мм. Потери мощности излучения в волноводном тракте, содержащем СПЗ, были на 4,5 %

больше, чем в тракте из тех же волноводов, состыкованных вплотную. Эти потери с точностью до погрешности относительных измерений мощности ( $\pm 0,5 \%$ ) равны тепловым потерям на поворотных зеркалах, следовательно, участки свободного пространства СПЗ почти не вносили дополнительных потерь. Для сравнения моделировалось сопряжение волноводов с помощью двух плоских зеркал, для чего волноводы раздвигались вдоль оптической оси на 40 мм (минимальный участок свободного пространства при таком сопряжении волноводов равен  $4a$ ). В этом случае потери были на 29 % больше, чем в тракте из состыкованных вплотную волноводов. Очевидно, что все дополнительные потери были вызваны дифракцией на участке свободного пространства.

Таким образом, данная система поворотных зеркал может быть использована для построения широкодиапазонных свернутых конструкций СММ лазеров.

## **2. Формирование мод с заданным профилем выходного излучения в волноводных лазерах**

Волноводные газовые лазеры находят широкое применение в различных научных и технических сферах. Существует ряд научных и прикладных задач, где использование лазерных пучков с гауссовым профилем излучения, формирующихся в резонаторах с обычными плоскими или сферическими зеркалами, не является оптимальным. При применении лазеров в технологиях поверхностной обработки материалов, для отжига дефектов полупроводников, литографии, локации, в системах оптоэлектронной обработки информации, в медицине желательны пучки с равномерным распределением интенсивности в поперечном сечении, резко спадающим на краях апертуры. В научной литературе предложены для практической реализации сверхмногомодовые, уплотненные гауссовы и супергауссовы профили излучения.

Заданный профиль распределения интенсивности выходного пучка в лазерных системах получают, используя как внerezонаторные, так и внутризрезонаторные методы. Общей чертой известных внутризрезонаторных методов фор-

мирования выходных лазерных пучков заданного профиля является использование исходно одномодового поля или нескольких низших разночастотных поперечных мод. Существует, однако, возможность формирования однородного распределения достаточно многомодового исходного поля за счет когерентного суммирования совокупности поперечных мод волноводного типа. Ясно, что для реализации такой возможности в общем случае необходим комбинированный резонатор, состоящий из многомодового волновода и согласованного с ним участка свободного распространения излучения для осуществления когерентного суммирования мод.

В волноводных газовых лазерах применяются комбинированные квазиоптические резонаторы, содержащие многомодовые сверхразмерные волноводы и участки свободного пространства. Поэтому методы формирования выходных пучков заданного профиля в таких лазерах должны основываться на тщательном выборе геометрических параметров и согласовании полых волноводов и участков свободного пространства для осуществления когерентного суммирования поперечных мод волноводного типа.

В 1 разделе данной работы описан комбинированный волноводный резонатор, состоящий из двух волноводов, оптически связанных системой поворотных зеркал. СПЗ аналогична схеме построения открытого обобщенного конфокального резонатора (см. работу №4), которая позволила увеличить селективность по отношению к основной моде и получить на выходе твердотельных и газовых инфракрасных лазеров однородный выходной пучок. В литературе [19] показана возможность неискаженной передачи волновых полей по многомодовым волноводам определенных размеров – полигармоническим волноводам. Используя данные подходы к построению лазерных резонаторов, можно реализовать новый метод получения выходного равномерного профиля интенсивности излучения в волноводном лазере на основе комбинированного резонатора, включающего ОКР с неоднородным зеркалом и полигармонический волновод.

Пусть распределение комплексной амплитуды компоненты поля на выходном зеркале комбинированного волноводного резонатора и соответственно

на торце полого диэлектрического волновода, обращенного к фазовому корректору, описывается круговой функцией:

$$\text{circ}(\rho_1) = \begin{cases} 1, & \rho_1 \leq 1, \\ 0, & \rho_1 > 1. \end{cases}$$

Преобразование Фурье–Бесселя этой функции с точностью до постоянного множителя в случае бесконечного фазового корректора имеет вид функции “сомбреро”:

$$\text{somb}(\rho) = \frac{2J_1(C\rho)}{C\rho},$$

где  $C = 2\pi N_{12}$ ;  $N_{12} = a_1 a_2 / \lambda F$  – число Френеля,  $J_1$  – функция Бесселя первого рода первого порядка.

Выбрав размеры волноводов соответствующими условиям самоизображения в полых диэлектрических волноводах пучков излучения с распределением амплитуды поля вида круговой функции и расположив поглощающие или рассеивающие элементы на обратном зеркале волноводного резонатора в координатах  $\rho_g = \nu_{1g} / 2\pi N_{12}$ , где  $\nu_{1g}$  – корни функции  $J_1$ ,  $g = 1, 2, 3, \dots$ , можно ожидать формирования моды с однородным поперечным распределением амплитуды (фурье-моды) на выходном зеркале лазерного резонатора и в ближней зоне дифракции возле него. При этом, поперечные размеры разнородных участков, на границах которых имеется скачок материальных постоянных, должны превышать длину волны. В областях с непрерывным изменением электродинамических свойств отражателей эти изменения пренебрежимо малы на размерах порядка  $\lambda$ .

### Лабораторное задание

1. Изучить механизм формирования типов колебаний в комбинированных волноводных резонаторах.
2. Изучить механизм формирования выходного однородного поля излучения в субмиллиметровом лазере с комбинированным волноводным резонатором и

неоднородным зеркалом.

3. Провести измерение спектральных характеристик выходной интенсивности излучения субмиллиметрового лазера с неоднородным отражателем (см. работу №3).
4. Провести измерение радиальных распределений интенсивности выходного излучения субмиллиметрового лазера в ближней и дальней зонах дифракции от выходного отражателя лазера.
5. Определить угловую расходимость лазера методом сечений (см. работу №2).

### **Методика и порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться со структурной схемой оптически накачиваемого субмиллиметрового лазера и экспериментальной установки для его исследования, приведенной на рис. 5.3.

Для накачки СММ лазера используется  $\text{CO}_2$ -лазер с разрядом постоянного тока, перестраиваемый по  $P$  и  $R$  ветвям с помощью эшелетта. Конструкция  $\text{CO}_2$ -лазера подробно описана в работе №1. С помощью плоского 11 и сферического (с радиусом кривизны 500 мм) 12 зеркал излучение  $\text{CO}_2$ -лазера фокусируется на отверстии связи резонатора СММ ячейки.

СММ ячейка представляет собой вакуумный объем, выполненный из стеклянной трубы с внутренним диаметром 80 мм и длиной 610 мм. Резонатор образован двумя кварцевыми волноводами 15 с диаметром 9,6 мм и длиной 470 мм. Длины волноводов выбраны соответствующими условиям самоизображения в полых диэлектрических волноводах пучков излучения с распределением амплитуды поля вида супергауссовой функции  $L \approx 2,4 a_1^2/\lambda$  [19]. Фазовыми корректорами являются два сферических зеркала 17 диаметром 40 мм и с фокусным расстоянием 80 мм. Для снятия частотного вырождения резонаторных мод фазовые корректоры расположены на близком к фокусному расстоянию от торцов волноводов и зеркала 16 ( $G_{1(2)} = 1 - \epsilon_{1(2)} / F \approx -0,01$ ). В качестве зеркала 16 в эксперименте использовалось алюминиевое неоднородное амплитудно-ступенчатое зеркало диаметром 12 мм. Оно выполняет также роль поворотного

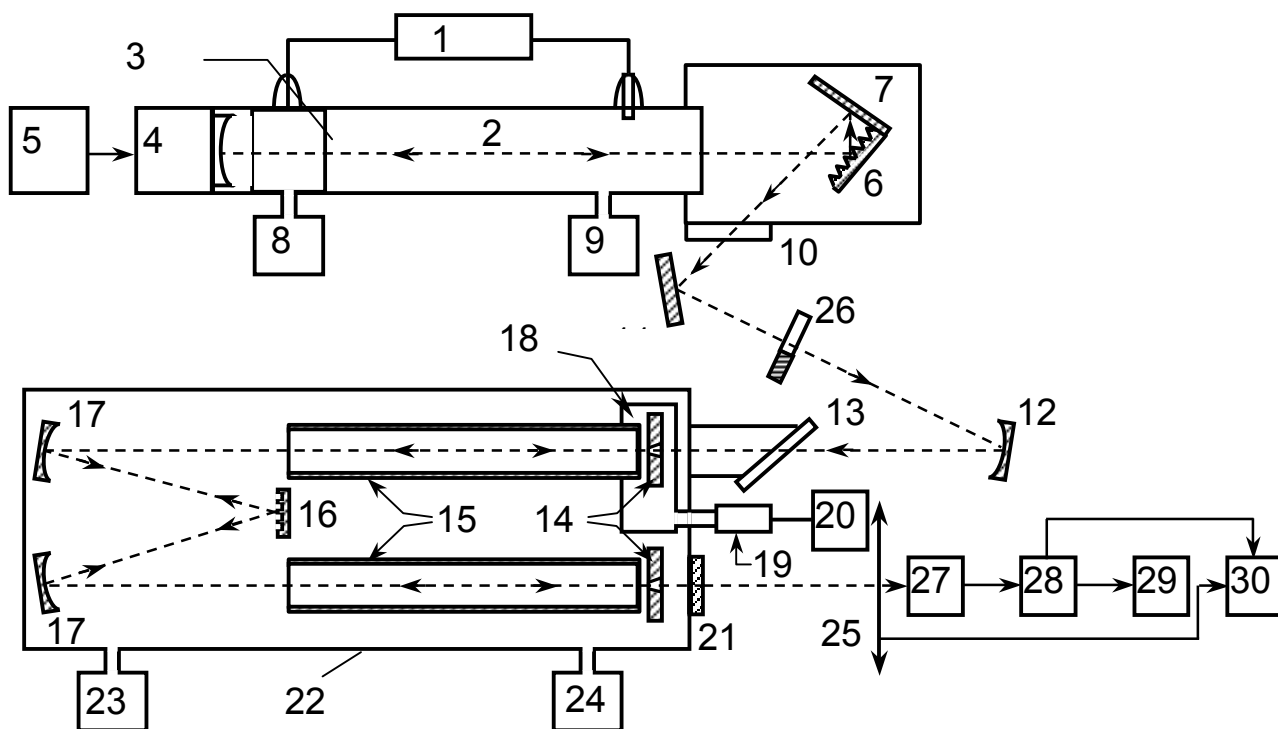


Рис. 5.3. Структурная схема субмиллиметрового лазера с амплитудно-ступенчатым зеркалом: 1 – высоковольтный источник питания CO<sub>2</sub>-лазера; 2 – разрядная трубка; 3 – сферическое зеркало; 4 – пьезоэлемент; 5 – источник напряжения постоянного тока; 6 – дифракционная решетка; 7 – угольный отражатель; 8 – система откачки CO<sub>2</sub>-лазера; 9 – система напуска рабочей смеси CO<sub>2</sub>-лазера; 10, 13 – пластины NaCl; 11 – плоское зеркало; 12 – сферическое зеркало; 14 – зеркала с отверстием связи; 15 – кварцевые волноводы; 16 – амплитудно-ступенчатое зеркало; 17 – сферические зеркала СПЗ; 18 – устройство перемещения зеркала резонатора; 19 – микрометрический винт; 20 – электродвигатель; 21 – кварцевая пластина; 22 – вакуумный объем; 23 – система откачки СММ ячейки; 24 – система напуска рабочего газа в СММ ячейку; 25 – устройство азимутального перемещения приемника; 26 – механический модулятор; 27 – приемник СММ излучения; 28 – усилитель; 29 – осциллограф; 30 – самописец

в СПЗ (17, 16, 17).

Неоднородное зеркало изготовлено механическим методом с помощью специального резца в виде чередующихся отражающих колец и поглощающих излучение канавок. Поглощающие канавки протачивались резцом на глубину  $\approx 0,2$  мм ( $1,68\lambda$ ) под углом  $30^\circ$  к плоскости отражающей поверхности зеркала. Это обеспечивало вывод отраженных от поверхности канавок лучей из резонатора лазера, что аналогично практически полному поглощению излучения на



этих участках зеркала. Измеренный диаметр центрального отражающего участка зеркала равен  $2,52 \text{ мм} \pm 0.01 \text{ мм}$  ( $21,21\lambda \pm 0,08\lambda$ ). Ширина отражающих колец и последующих поглощающих канавок приведена в табл. 5.1. Здесь  $N$  – порядковый номер, показывающий расположение канавок и колец относительно центра зеркала.

Таблица 5.1

Геометрические параметры амплитудного пространственного фильтра

N	Ширина кольца		Ширина канавки	
	в ед. $\lambda$	( мм )	в ед. $\lambda$	( мм )
1	10,60	1,26	3,03	0,36
2	6,57	0,78	3,03	0,36

Зеркала резонатора 14 – медные плоские, с центральными отверстиями связи диаметром 2 мм. Проведенные расчеты показали, что при таких диаметрах отверстий связи поле на зеркалах 14 практически не отличается от поля на зеркалах без отверстий. Все элементы резонатора расположены на общей станине. На ней размещен механизм плоскопараллельного перемещения 18, на котором закреплено одно из зеркал 14. Перемещение зеркала осуществляется микрометрическим винтом 19, расположенным за пределами вакуумного объема. Предусмотрена возможность автоматического перемещения зеркала с помощью электродвигателя 20.

Системы откачки 23 и газонаполнения 24 обеспечивают возможность напуска выбранного рабочего вещества в СММ объем и поддержания оптимального давления для получения максимальной выходной мощности. Система регистрации лазерного излучения состоит из приемника СММ излучения (пирометрический детектор) 27, усилителя 28 (типа У2-8), осциллографа 29 (типа С1-93) и самописца 30 (типа КСП 4). Приемник закреплен в механизме азимутального перемещения. При этом обеспечивалась временная синхронизация самописца с механизмами перемещения приемника или зеркала резонатора. При исследовании спектра излучения лазера использовался приемник с

рупором раскрывом 20 мм, а при исследовании распределения интенсивности диаметр приемной площадки был равен 2 мм.

2. Включить CO<sub>2</sub>-лазер и СММ ячейку и получить генерацию на линии метилового спирта с длиной волны 0,1188 мм (под непосредственным контролем лаборанта!). Включить механический прерыватель и регистрирующую аппаратуру. Дать прогреться измерительной установке в течение 30 минут.

### **ВНИМАНИЕ!**

При работе с CO<sub>2</sub>-лазером следует строго соблюдать правила техники безопасности. Источниками повышенной опасности являются:

- 1) постоянное напряжение до 3 кВ на аноде лазера;
- 2) инфракрасное излучение мощностью до 30 Вт.

**Следует избегать касания находящихся под напряжением частей лазера и работать в защитных очках.**

3. Снять спектральные характеристики выходной интенсивности излучения лазера в зависимости от изменения частоты резонатора с использованием в качестве зеркала 16 амплитудно-ступенчатого зеркала.

4. Используя спектральные характеристики, рассчитать по формуле (3.4) межмодовые частотные разделения первой и второй, первой и третьей по добротности мод для лазера в случае применения в качестве зеркала 16 однородного зеркала.

5. Зарегистрировать на самописце поперечное распределение интенсивности выходного излучения СН<sub>3</sub>ОН-лазера на расстояниях 380 и 670 мм от выходного отражателя лазера в дальней зоне, смещая устройство сканирования по оптической скамье.

6. Измерить ширину главного лепестка лазерного пучка на уровне интенсивности 0,5 от максимальной и построить график ее зависимости от расстояния до выходного отражателя лазера.

7. Определить угловую расходимость пучка данного лазера по формуле

$\Theta = \frac{a_1 - a_2}{z_1 - z_2}$ , где  $a_{1,2}$  – ширина главного лепестка на уровне 0,5 в сечениях, рас-

положенных на расстояниях  $z_{1,2}$  от выходного отражателя лазера в дальней зоне дифракции пучка.

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните механизм формирования типов колебаний в комбинированном волноводном лазерном резонаторе.
2. Укажите условия выбора фокальных расстояний сферических зеркал при заданных поперечных размерах волноводов и зеркал.
3. Объясните принцип волноводной передачи изображений поля.
4. Объясните механизм формирования выходного однородного поля излучения в субмиллиметровом лазере с комбинированным резонатором.
5. Назвать методы формирования мод с заданным профилем выходного излучения в волноводных лазерах.
6. Объясните принцип работы пироэлектрического приемника.
7. Какие существуют методы измерения расходимости лазерного пучка.

## **Р а б о т а 6. ИССЛЕДОВАНИЕ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ЛАЗЕРА С МОДОВЫМ СЕЛЕКТОРОМ**

### **Цель работы**

1. Изучение методов селекции поперечных мод лазерных резонаторов, а также получение практических навыков работы с излучением лазеров субмиллиметрового диапазона длин волн.
2. Измерение спектральных характеристик субмиллиметрового лазера с модовым селектором.

Литература: [7, 8, 20, 21]

### **Общие сведения**

Широкодиапазонные субмиллиметровые (СММ) лазеры с оптической накачкой (ЛОН) можно создать на основе квазиоптического металлического волноводного резонатора. Лазеры на основе такого резонатора обеспечивают возможность их дискретной перестройки по всему субмиллиметровому диапазону (0,1–1 мм) без замены элементов резонатора. Реализовать указанный режим генерации в СММ ЛОН возможно только при применении широкодиапазонных устройств связи резонатора со свободным пространством. Наиболее просто это можно осуществить в резонаторе при выводе излучения через отверстие связи в зеркале. Кроме очевидных преимуществ такого резонатора (низкие потери, компактность) он имеет существенный недостаток – потери многих мод в нем незначительные. Это приводит к многомодовости выходного излучения лазера, построенного на его основе.

Исследуемый в работе волноводный лазерный резонатор представляет собой отрезок круглого многомодового металлического волновода (диаметр значительно больше длины волны), вблизи торцов которого расположены зеркала. Одно из зеркал (входное) имеет отверстие, расположенное на оси резонатора и предназначенное для ввода через него излучения накачки в полость резонатора. Второе зеркало (выходное) обычно обеспечивает вывод части излучения из резонатора. Оно может иметь либо однородные по апертуре коэффи-

циенты отражения и пропускания (емкостная или индуктивная решетка), либо неоднородные (например, зеркало с отверстиями связи).

Процесс формирования резонаторных типов колебаний описывается как интерференция распространяющихся навстречу друг другу по волноводу и на участках свободного пространства волновых пучков, отражаемых зеркалами. Если зеркала слабо возмущают волноводные моды, то можно приближенно считать, что резонаторная мода образована двумя встречными волноводными модами. В коротковолновой части рабочего диапазона ( $\lambda < 0,4$  мм) большое число мод имеют потери в волноводе пренебрежительно малые по сравнению с потерями в других элементах резонатора. В многомодовом лазерном резонаторе генерируемое излучение имеет большую расходимость. Такой режим работы генератора приводит также к значительному ухудшению таких основных характеристик лазерного излучения как монохроматичность и когерентность. Для его улучшения необходимо уменьшить число генерируемых мод, предпочтительно до одной моды.

Разрежение спектра поперечных мод основано на различии в распределении полей у мод с различными поперечными индексами, что приводит к различию дифракционных потерь.

Самый простой метод, чтобы выборочно ослабить определенные части распределения интенсивности мод и таким образом провести их селекцию, состоит в том, чтобы поместить амплитудные поглощающие элементы типа проволочных сеток в лазерный резонатор. Однако такие элементы вносят потери на поглощение и нагреваются, поэтому они относительно неэффективны. Более высокая эффективность может быть получена с непоглощающими фазовыми элементами, которые вносят требуемые потери благодаря процессам дифракции и интерференции излучения на них.

Также возможно селектировать требуемую моду, прибегнув к специальным конфигурациям лазерных резонаторов. Например, с помощью “самоизображающих” резонаторов, использующих эффект Тальбо (дифракционного самовоспроизведения волнового поля после прохождения некоторого расстоя-

ния).

Эффективным методом селекции поперечных мод в открытых резонаторах является использование диафрагмы. Последняя позволяет селективировать одну или несколько поперечных мод низшего порядка в лазерном резонаторе.

Известны методы формирования и селекции поперечных мод, основанные на введении в лазерный резонатор специальным образом сконструированных призм, интерферометров, оптических элементов, которые заменяют обычно используемую в этих случаях внутрирезонаторную диафрагму.

Использование квазиоптических волноводных резонаторов позволяет создавать малогабаритные молекулярные лазеры с оптической накачкой. Малые потери резонатора при широком частотном диапазоне перестройки можно получить с использованием сверхразмерных полых металлических волноводов при условии  $a/\lambda_{\max} \geq 10$  ( $a$  – радиус волновода,  $\lambda_{\max}$  – максимальная длина волны в рабочем диапазоне).

Существенным недостатком лазеров с резонатором на основе металлического волновода является многомодовость излучения, так как потери многих поперечных мод в них незначительны. Поэтому актуальной проблемой для таких генераторов является селекция поперечных мод и получение одномодовой генерации. Ни один из известных методов селекции не способен эффективно работать в широком диапазоне длин волн без соответствующего изменения параметров селектора. Поэтому селектирующее устройство должно быть легко управляемым в процессе перестройки лазера. Кроме того, селектор не должен затруднять распространение излучения накачки, для которого резонатор лазера является многоходовой кюветой. Данным требованиям удовлетворяет метод селекции поперечных мод в волноводном резонаторе свернутой конструкции, который основан на диафрагмировании плоского зеркала системы поворотных зеркал.

Для резонатора приведенного на рис. 6.1 характерный размер пучка на плоском зеркале СПЗ (в области Фурье-образа для исходного пучка на торце волновода) равен произведению угла расходимости пучка в дальней зоне

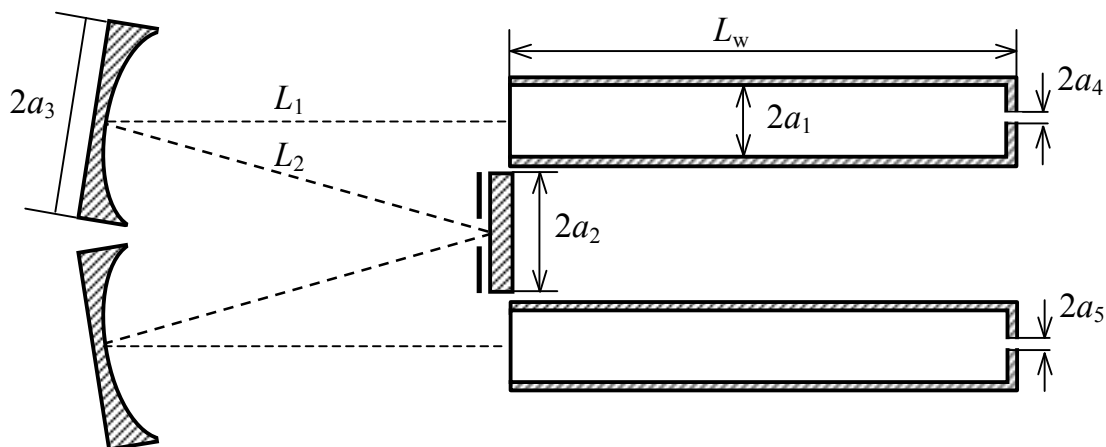


Рис. 6.1. Теоретическая модель исследуемого резонатора

дифракции (пропорционального  $\lambda/a_1$ ) на фокусное расстояние сферического зеркала  $f$ . Уменьшая радиус плоского зеркала  $a_2$ , можно ожидать подавления резонаторных мод, сформированных высшими волнами волновода, поскольку угол расходимости последних растет с увеличением их поперечных индексов  $n, m$ .

### Лабораторное задание

1. Изучить методы селекции поперечных мод волноводных лазерных резонаторов.
2. Освоить методику регистрации спектральной характеристики лазера.
3. Провести измерения поперечного распределения интенсивности лазерного пучка при различных диаметрах плоского зеркала системы поворотных зеркал.
4. Идентифицировать моды в спектральной характеристике лазера.
5. Снять зависимость выходной мощности лазера от диаметра плоского зеркала СПЗ для трех низших мод.

### Методика и порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с блок-схемой измерительной установки, приведенной на рис. 6.2.

Для накачки СММ лазера используется  $\text{CO}_2$ -лазер с разрядом постоянного тока, перестраиваемый по  $P$  и  $R$  ветвям с помощью эшелетта. Конструкция

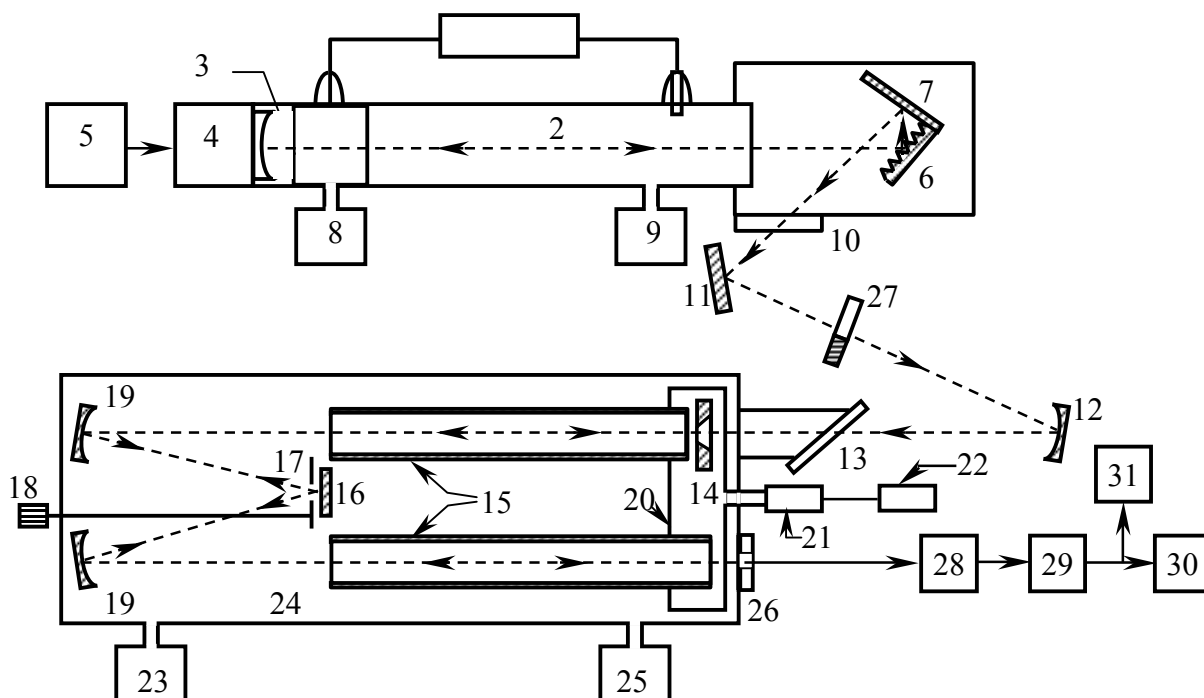


Рис. 6.2. Структурная схема субмиллиметрового лазера с модовым селектором: 1 – высоковольтный источник питания  $\text{CO}_2$ -лазера; 2 – разрядная трубка; 3 – сферическое зеркало; 4 – пьезоэлемент; 5 – источник напряжения постоянного тока; 6 – эшелетт; 7 – угловой отражатель; 8 – система откачки  $\text{CO}_2$ -лазера; 9 – система напуска рабочей смеси  $\text{CO}_2$ -лазера; 10, 13 – пластины  $\text{NaCl}$ ; 11 – плоское зеркало; 12 – сферическое зеркало; 14 – зеркало с отверстием для ввода излучения накачки; 15 – медные волноводы; 16 – плоское зеркало СПЗ; 17 – диафрагма; 18 – устройство установки диаметра диафрагмы; 19 – сферические зеркала СПЗ; 20 – механизм плоскопараллельного перемещения зеркала; 21 – микрометрический винт; 22 – электродвигатель; 23 – система откачки СММ ячейки; 24 – вакуумный объем; 25 – система напуска рабочего газа в СММ ячейку; 26 – выходное зеркало; 27 – механический модулятор; 28 – приемник СММ излучения; 29 – усилитель; 30 – осциллограф; 31 – самописец

$\text{CO}_2$ -лазера подробно описана в работе №1. С помощью плоского 11 и сферического (с радиусом кривизны 1 м) 12 зеркал модулированное механическим прерывателем 27 излучение  $\text{CO}_2$ -лазера фокусируется на отверстии связи резонатора СММ ячейки.

Субмиллиметровая ячейка представляет собой вакуумный объем, выполненный из стеклянной трубы с внутренним диаметром 80 мм и длиной 550 мм. Резонатор образован медными волноводами 15 диаметром 19,8 мм и длиной 445 и 465 мм, СПЗ и двумя плоскими зеркалами 14 и 26. СПЗ состоит из двух



сферических зеркал 19 с фокусным расстоянием 80 мм и плоского зеркала 16. Диаметр отражающей поверхности плоского зеркала 16 изменялся от 2 до 10 мм расположенной вплотную к ней ирисовой диафрагмой 17. Изменение диаметра диафрагмы производится специальным механизмом 18, управление которым осуществляется за пределами вакуумного объема. Зеркало 14 изготовлено из нержавеющей стали с алюминиевым покрытием, имеет центральное отверстие связи диаметром 1,5 мм для ввода излучения накачки. Зеркало 26 представляет собой плоскопараллельную пластину кристаллического кварца, напыленную алюминием с внутренней стороны. Для вывода СММ излучения используются пластины с ненапыленной центральной частью диаметром 5 мм.

Все элементы резонатора расположены на общей станине, на которой закреплен механизм плоскопараллельного перемещения 20 зеркала 14. С помощью микрометрического винта 21, расположенного за пределами вакуумного объема, изменяется положение зеркала 14 и, соответственно, длина резонатора. Автоматическое управление движением зеркала осуществляется электродвигателем 22, ось которого жестко связана с винтом 21.

Система откачки 23 и газонаполнения 25 обеспечивает возможность напуска выбранного рабочего вещества в СММ объем и поддержания давления, позволяющего получить максимальную выходную мощность лазера.

Исследование эффективности работы модового селектора проводится в коротковолновой области СММ диапазона, где потери большего числа поперечных мод незначительны. Лазер на молекуле  $\text{CH}_3\text{OH}$  ( $\lambda = 118,8$  мкм) перестраивается при перемещении зеркала 14 электроприводом (рис. 6.2). Модулированное выходное СММ излучение принимается пироэлектрическим детектором 28 с чувствительностью 4 В/Вт. Напряжение с детектора подается на измерительный усилитель 29, показания которого пропорциональны выходной мощности лазера. Сигнал усилителя регистрируется также осциллографом 30 и самописцем 31. Используется временная синхронизация движения ленты самописца и перемещения зеркала 14. Для исследования поперечного распределения интенсивности выходного излучения предусмотрена возможность сканирова-

ния пироэлектрического приемника с пространственным разрешением 1,5 мм в плоскости, перпендикулярной направлению излучения лазера.

### **ВНИМАНИЕ!**

При работе с CO<sub>2</sub>-лазером следует строго соблюдать правила техники безопасности. Источниками повышенной опасности являются:

- 1) постоянное напряжение до 15 кВ на аноде лазера;
- 2) инфракрасное излучение мощностью до 30 Вт.

**Следует избегать касания находящихся под напряжением частей лазера и работать в защитных очках.**

2. Снять спектральные характеристики лазера с выходным отражателем с отверстием связи диаметром 5 мм для трех различных диаметров плоского зеркала системы поворотных зеркал ( $d = 9,5; 6,5$  и  $4,5$  мм). Идентифицировать моды в спектральной характеристике лазера.

3. Зарегистрировать на самописце поперечные распределения интенсивности выходного излучения СММ лазера на моде TE<sub>01</sub> при диаметре плоского зеркала системы поворотных зеркал 9,5 и 4,5 мм.

4. Снять зависимость выходной мощности лазера от диаметра плоского зеркала СПЗ для TE<sub>01</sub> и TE<sub>11</sub> мод.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите известные вам типы резонаторов СММ лазеров, их достоинства и недостатки.

2. Объясните методы селекции поперечных мод волноводных лазерных резонаторов.

3. Зачем в резонаторе СММ лазера использована система поворотных зеркал?

4. Поясните методику регистрации спектральной характеристики лазера.

5. Как изменяются спектральные характеристики лазера при различных диаметрах плоского зеркала СПЗ?

6. Как устроено устройство для измерения поперечного распределения

интенсивности лазерного пучка.

7. Почему при изменении диаметра плоского зеркала СПЗ наблюдаются различные поперечные распределения интенсивности выходного излучения СММ лазера?

8. Объясните принцип работы модового селектора в лабораторной установке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудкин В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. Приборы и их применения. – М.: Техносфера, 2006. – 432 с.
2. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. – М.: Наука, 1988. – 336 с.
3. Рябов С.Г., Торопкин Г.Н., Усольцев И.Ф. Приборы квантовой электроники. – М.: Радио и связь, 1982. – 280 с.
4. Анохов С.П., Марусий Т.Н., Соскин М.С. Перестраиваемые лазеры. – М.: Радио и связь, 1982. – 360 с.
5. Тобин М.С. Лазеры ближнего миллиметрового диапазона с оптической накачкой: Обзор // ТИИЭР. – 1985. – Т.73, № 1. – С.67–95.
6. Григорук В.І., Іванісік А.І., Коротков П.А. Експериментальна лазерна оптика: Підручник. – К.: Київський університет, 2007. – 383 с.
7. Техника субмиллиметровых волн. Под ред. Р.А. Валитова. – М.: Сов. радио, 1969. – 480 с.
8. Зубов В.А. Методы измерения характеристик лазерного излучения. – М.: Наука, 1973. – 192 с.
9. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1978. – 544 с.
10. Сравнительный анализ резонаторов одномодовых лазеров / Н.Г. Вахитов, М.П. Исаев, В.Р. Кушнир, Г.А. Шариф // Квантовая электроника. – 1987. – Т.14, № 8. – С.1633–1637.
11. Промышленное применение лазеров/ Под ред. Г. Кебнера. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
12. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. – М.: Наука, 1985. – 336 с.
13. Belanger P.A., Pare C. Optical resonators using graded-phase mirrors // Opt. Lett. – 1991. – Vol.16, № 14. – P.1057–1059.
14. Leger J.R., Chen D., Wang Z. Diffractive optical element for mode shaping of a Nd:YAG laser // Opt. Lett. – 1994. – Vol.19, № 2. – P.108–110.

15. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. Пер. с англ. / Под ред. Г.И. Косоурова. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
16. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям. – М.: Мир, 1983. – 349 с.
17. Очкин В.Н. Волноводные газовые лазеры. – М.: Знание, 1988. – 64 с.
18. Маслов В.А., Свич В.А., Ткаченко В.М., Топков А.Н., Юндев Д.Н. Компактный широкодиапазонный субмиллиметровый лазер // Физика плазмы. – 1994. – Т.20, № 1. – С.30–32.
19. Григорьева Е.Е., Семенов А.Т. Волноводная передача изображений в когерентном свете (обзор) // Квантовая электроника. – 1978. – Т.5, № 9. – С.1877–1895.
20. Гурин О.В., Дегтярев А.В., Маслов В.А., Свич В.А., Ткаченко В.М., Топков А.Н. Волноводный субмиллиметровый лазер с модовым селектором // Радиофизика и электроника. – Сб. научных тр., Харьков, Институт радиофизики и электроники НАН Украины. – 2003. – Т.8, № 1. – С.131–135.
21. Гурин О.В., Дегтярев А.В., Маслов В.А., Свич В.А., Ткаченко В.М., Топков А.Н. Селекция поперечных мод в лазерном резонаторе, содержащих волноводные и открытые участки // Квантовая электроника. – 2001. – Т.31, №4. – С.346–350.
22. Загорский Я.Т., Котюк А.Ф. Основы метрологического обеспечения лазерной энергетической фотометрии. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 171 с.
23. Иващенко П.А., Калинин Ю.А., Морозов Б.Н. Измерение параметров лазеров. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 168 с.
24. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения/ Под ред. А.Ф. Котюка. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
25. Измерение спектрально-частотных и корреляционных параметров и характеристик лазерного излучения/ Под ред. А.Ф. Котюка и Б.М. Степанова. – М.: Радио и связь, 1982. – 272 с.
26. Основы оптической радиометрии/ Под ред. проф. А.Ф. Котюка. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 544 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания.....	3
Работа 1. ИССЛЕДОВАНИЕ CO <sub>2</sub> –ЛАЗЕРА С ВОЛНОВЫМ СЕЛЕКТОРОМ .....	5
Работа 2. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОЙ РАСХОДИМОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ЛАЗЕРА.....	16
Работа 3. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВ КОЛЕБАНИЙ ВОЛНОВОДНОГО ЛАЗЕРНОГО РЕЗОНАТОРА.....	26
Работа 4. ИССЛЕДОВАНИЕ CO <sub>2</sub> –ЛАЗЕРА С НЕОДНОРОДНЫМ ЗЕРКАЛОМ .....	35
Работа 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ЛАЗЕРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЛНОВОДНЫМ РЕЗОНАТОРОМ.....	47
Работа 6. ИССЛЕДОВАНИЕ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ЛАЗЕРА С МОДОВЫМ СЕЛЕКТОРОМ.....	60
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	68

Навчальне видання

**Свіч** Василь Антонович  
**Маслов** Вячеслав Олександрович  
**Дегтярьов** Андрій Вікторович

## **ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРІВ**

Методичні вказівки до лабораторних робіт

Коректор Л. Є. Ткаченко  
Комп'ютерна верстка  
Макет обкладинки И. М. Дончик

Підписано до друку 26.07.09. Формат 60×84/16  
Папір офсетний. Друк ризографічний.  
Обл. – вид. арк. 1,83. Умов. друк. арк. 1,46.  
Наклад 100 прим. Ціна договірна.

61077, Харків, пл. Свободи, 4,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна

Надруковано ХНУ імені В. Н. Каразіна  
61077, м. Харків, пл. Свободи, 4  
Тел: 705-24-32

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3367 від 13.01.09